



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen
auf das Einzugsgebiet der Wiener
Hochquellenleitungen“

Verfasserin

Christina Maria Schartner

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat)

Wien, 2008

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 453

Studienrichtung lt. Studienblatt: Theoretische und Angewandte Geographie

Betreuer: O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans-Peter Nachtnebel

DANKSAGUNG

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Dr. Gerhard Kuschnig, Referent für Quellenschutz, Forschung und EU-Förderung der Wiener Wasserwerke, der es mir ermöglichte, diese sehr praxisnahe Arbeit zu verfassen, sehr herzlich bedanken. Durch etliche Besuche im Quellenschutzgebiet unter der fachkundigen Leitung von ihm und anderen Mitarbeitern der Wiener Wasserwerke, bei denen ich mich hiermit auch bedanken möchte, bekam ich einen umfassenden Überblick und detailliertes Wissen über das Gebiet und somit einen sehr engen, praxisnahen Bezug zu meiner Arbeit.

In diesem Zusammenhang ein großes Danke an die Wiener Wasserwerke, die meine Arbeit gefördert haben.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Univ.-Prof. Dr. Hans-Peter Nachtnebel, der meine Diplomarbeit wissenschaftlich betreut hat. Die Zusammenarbeit war für mich äußerst konstruktiv und bereichernd.

Des Weiteren bedanke ich mich bei DI Mathew Herrnegger und meinen Studienkollegen Mag. Bernhard Fürst und Klaus Haslinger für die fachliche Unterstützung bei schwierigen Fragen.

Großer Dank gilt meinen Eltern, Aloisia Maria Schartner und Karl Schartner, für die Selbstverständlichkeit mit der sie meine Ausbildung finanziell und ideell gefördert haben. Außerdem vielen Dank an meine Mutter für das Korrekturlesen der Arbeit.

Vielen Dank auch an meinen Bruder, DI Gerd Schartner, der mir stets mit einem guten Rat zur Seite stand.

Nicht zuletzt möchte ich mich für die großartige Unterstützung meines Freundes Michael Formanek bedanken.

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war es, mögliche Klimaänderungen im Großraum des Einzugsgebietes der Wiener Hochquellenleitungen festzustellen und anhand von Simulationen von regionalen Klimamodellen einen Ausblick auf mögliche Änderungen des Klimas bereitzustellen.

Zur Analyse der Beobachtungsdaten wurden Langzeitreihen von Niederschlag, Abfluss und Temperatur herangezogen. Als Kriterium für die Länge der Zeitreihen wird ein Minimum von 50 Jahren vorausgesetzt, wobei die längsten Messreihen bis in das Jahr 1893 zurückreichen. Diese Daten wurden statistisch analysiert, um signifikante Trends zu erkennen.

Die Ergebnisse zeigen kaum signifikante, einheitliche Trendänderungen von Temperatur, Niederschlag und Abfluss im Jahresmittel, während nach saisonaler Aufspaltung der Daten ein eindeutiger Trend zur Temperaturerhöhung und zur Niederschlags- und Abflussabnahme im Sommer zu verzeichnen ist. Zum Vergleich wurden auch die Daten der Wasserbilanz und die Trends der Wasservorratsänderungen aus dem Hydrologischen Atlas Österreichs herangezogen.

Um einen Ausblick auf mögliche Entwicklungen des Klimas zu geben, werden zunächst die Ergebnisse der Klimasimulationen des 4. Sachstandsberichts des IPCC auf globaler Ebene und auf Europaebene zusammengefasst. In diesem Zusammenhang werden die Bewertung von Klimamodellen und die Probleme der Klimasimulation ausführlich diskutiert.

Die Ergebnisse der Klimasimulationen des Niederschlags, des Abflusses und der Temperatur von vier regionalen Klimamodellen wurden auf Österreichebene dargestellt um die möglichen Entwicklungen auch auf der lokalen Ebene des Untersuchungsgebiets erkennen zu können. Es handelt sich hierbei um die regionalen Klimamodelle CHRM (ETH Zürich), HIRHAM (Dänisches Meteorologisches Institut), RACMO (Niederländisches Meteorologisches Institut) und um das Modell des deutschen Max-Planck-Instituts, REMO.

Die Modellergebnisse weichen teilweise stark voneinander ab, zeigen sogar in verschiedene Richtungen. Nur bei Betrachtung der Temperaturentwicklungen wurde ein eindeutiger Trend zur Zunahme dargestellt.

SUMMARY

The aim of this thesis is to analyze climatic changes in the catchment area of the Schwarza, Salza and Mürz, where the springs of the Vienna`s Waterworks have their origin.

First, the observed long-time data of precipitation, runoff and temperature have been statistically analyzed. The selected time series covered at least a period of 50 years. Some of them were even longer than 100 years and reached back to 1893.

The results showed nearly no significant changes in trends of the yearly means of precipitation, runoff and temperature in a specific direction. The data were then also explored seasonally. This showed a remarkable change in summer temperature conditions, runoff and precipitation. The temperature rose significantly, whereas runoff and precipitation had a tendency to fall. The data, which were used for this analysis, were compared to the data of the waterbalance of the hydrological atlas of Austria.

To get an overview of the development of future climate conditions, the main results of the 4th Assessment Report of the IPCC have been summarized. The major problems and uncertainties of climate models are discussed in this context.

The results of the climate simulations of precipitation, runoff and temperature of four regional climate models were presented on a local scale. The models that provided the data were: CHRM (ETH Zürich, Switzerland), HIRHAM (Danish Meteorological Institute), RACMO (Netherlands Meteorological Institute) and REMO (Max-Planck-Institute, Germany).

The model results vary remarkably at the catchment scale. Only the trends in temperature series indicate an increasing trend by the end of this century by all models.

INHALTSVERZEICHNIS

<i>1 Einleitung und Zielsetzung</i>	<i>9</i>
<i>2 Das Einzugsgebiet der Wiener Hochquellenleitungen und das Untersuchungsgebiet</i>	<i>10</i>
2.1 Das Einzugsgebiet der Wiener Hochquellenleitungen.....	10
2.2 Das Untersuchungsgebiet.....	11
2.3 Das Klima im Untersuchungsgebiet	13
2.3.1 Klimaklassifikation nach W. Köppen	15
2.4 Die Wasserbilanz im Untersuchungsgebiet.....	16
<i>3 Hydroklimatologische Analyse des Untersuchungsgebietes</i>	<i>18</i>
3.1 Methodik	18
3.1.1 Zeitreihenanalyse	18
3.1.2 Vorzeichen-Trendtest nach Cox und Stuart	19
3.1.3 Lineare Regression	20
3.2 Datenbasis.....	20
3.2.1 Die Niederschlagsmessstationen	20
3.2.2 Die Abflussmessstationen	23
3.2.3 Die Temperaturmessstationen.....	24
3.3 Anwendung.....	27
3.3.1 Trends im Niederschlag.....	27
3.3.2 Trends im Abfluss.....	31
3.3.3 Trends der Temperatur.....	33
3.3.4 Trends der Saisonalen Wasserbilanz	37
3.4 Auswertung und Zusammenfassung	39
<i>4 Klimamodellierung.....</i>	<i>42</i>
4.1 Geschichte der Klimamodellierung.....	42
4.2 Globale Zirkulationsmodelle.....	44
4.2 SRES Szenarien.....	46
4.3 Globale Klimaänderungen (nach IPCC)	48
4.3.1 Globale Temperaturveränderungen.....	48
4.3.2 Globale Veränderungen der Komponenten des Wasserkreislaufs...	49
4.3.3 Globale Veränderungen von Wetter- und Klimaextremen.....	51
4.4 Regionale Klimamodelle (RCM)	52
4.5 Klimaänderungen in Europa (nach IPCC)	54

4.5.1 Temperaturveränderungen in Europa.....	54
4.5.2 Veränderungen des Niederschlags in Europa	55
4.6 Bewertung und Probleme von Klimamodellen.....	56
<i>5 The Prudence Project.....</i>	<i>57</i>
5.1 Klimasimulationen im Untersuchungsgebiet.....	58
5.1.1 Ausgewählte Modelle	58
5.1.2 Ergebnisse der Klimasimulationen.....	60
<i>6 Zusammenfassung und Diskussion.....</i>	<i>65</i>
Konkrete Auswirkungen auf das Untersuchungsgebiet und Ausblick	68
<i>7 Literaturverzeichnis</i>	<i>70</i>
<i>8 Anhang.....</i>	<i>73</i>

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1: EINZUGSGEBIET DER WIENER HOCHQUELLENLEITUNGEN (QUELLE: WIENER WASSERWERKE)	10
ABBILDUNG 2: KLIMATYPENKARTE, MAßSTAB 1 : 2 000 000 (QUELLE: H. HITZ, L. BIRSAK, BEARBEITET)	13
ABBILDUNG 3: NIEDERSCHLAGS- BZW. TEMPERATURKARTE (QUELLE: ÖKLIM, ZAMG)	14
ABBILDUNG 4: WALTER-LIETH DIAGRAMME DER STATIONEN WILDALPEN, REICHENAU UND MÜRZSTEG (QUELLE: DATENQUELLE HZB, VERWENDETE SOFTWARE: „KLIMASTATION“ VON DJEKIC, Z.) ..	15
ABBILDUNG 5: DATENVERFÜGBARKEIT DER NIEDERSCHLAGSMESSSTATIONEN	23
ABBILDUNG 6: DATENVERFÜGBARKEIT TEMPERATURWERTE	26
ABBILDUNG 7: HORIZONTALE AUFLÖSUNG DER MODELLGENERATIONEN DES IPCC (QUELLE: LE TREUT ET AL., 2007)	43
ABBILDUNG 8: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES ERDSYSTEMMODELLS (QUELLE: CUBASCH, 2002)	46
ABBILDUNG 9: VIER FAMILIEN DER SRES-SZENARIEN (QUELLE: NAKICENOVIC ET AL., 2001; BEARBEITET)	47
ABBILDUNG 10: GLOBALE TEMPERATURVERÄNDERUNGEN (QUELLE: MEEHL ET AL., 2007, BEARBEITET)	49
ABBILDUNG 11: GLOBALE VERÄNDERUNGEN DES NIEDERSCHLAGS, DER BODENFEUCHTE, DES ABFLUSSES UND DER VERDUNSTUNG IN MM/TAG (QUELLE: MEEHL ET AL., 2007)	50
ABBILDUNG 12: DARSTELLUNG DER NIEDERSCHLAGSINTENSITÄT UND DER DÜRREPERIODEN (QUELLE: MEEHL ET AL., 2007)	52
ABBILDUNG 13: SIMULIERTE VERÄNDERUNGEN DES LUFTDRUCKS, DES NIEDERSCHLAGS UND DES WINDS DES RCM RCAO MIT UNTERSCHIEDLICHEN ANTRIEBSMODELLEN (QUELLE: CHRISTENSEN ET AL., 2007)	53
ABBILDUNG 14: MITTLERE TEMPERATURVERÄNDERUNGEN IN EUROPA, SZENARIO A1B, 21 MODELLE (QUELLE: CHRISTENSEN ET AL., 2007)	55
ABBILDUNG 15: MITTLERE VERÄNDERUNGEN DES NIEDERSCHLAGS IN EUROPA, SZENARIO A1B, 21 MODELLE UND ANZAHL DER MODELLE, DIE EINE ZUNAHME SIMULIEREN (QUELLE: CHRISTENSEN ET AL. 2007)	55
ABBILDUNG 16: DARSTELLUNG DER RÄUMLICHEN AUFLÖSUNG EINES REGIONALEN KLIMAMODELLS (50 KM) IM VERGLEICH MIT DER AUFLÖSUNG EINES GLOBALEN ZIRKULATIONSMODELLS (~300 KM)(QUELLE: PRUDENCE, 2001)	57
ABBILDUNG 17: RECHENBEREICHE DER REGIONALEN KLIMAMODELLE HIRHAM, CHRM, REMO UND HADRM (QUELLE: FREI ET AL., 2003).....	58
ABBILDUNG 18: WINTERNIEDERSCHLAG VON VERSCHIEDENEN MODELLEN (BEOBACHTUNG, CHRM, HIRHAM) ANGABEN IN MM/TAG (QUELLE: SCHÄR ET AL. 2000).....	60

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1: <i>HÖHENGLIEDERUNG NIEDERSCHLAGSMESSSTATIONEN</i>	12
TABELLE 2: <i>METADATEN DER NIEDERSCHLAGSMESSSTATIONEN</i>	21
TABELLE 3: <i>METADATEN DER ABFLUSSMESSSTATIONEN</i>	24
TABELLE 4: <i>METADATEN DER TEMPERATURMESSSTATIONEN</i>	25
TABELLE 5: <i>TRENDANALYSE DER JAHRESWERTE (NIEDERSCHLAG)</i>	27
TABELLE 6: <i>TRENDANALYSE DER FRÜHLINGSMONATE MAM (NIEDERSCHLAG)</i>	28
TABELLE 7: <i>TRENDANALYSE DER SOMMERMONATE JJA (NIEDERSCHLAG)</i>	29
TABELLE 8: <i>TRENDANALYSE DER HERBSTMONATE SON (NIEDERSCHLAG)</i>	30
TABELLE 9: <i>TRENDANALYSE DER WINTERMONATE DJF (NIEDERSCHLAG)</i>	30
TABELLE 10: <i>TRENDANALYSE DER JAHRESWERTE (ABFLUSS)</i>	31
TABELLE 11: <i>TRENDANALYSE DER FRÜHJARHSMONATE MAM (ABFLUSS)</i>	32
TABELLE 12: <i>TRENDANALYSE DER SOMMERMONATE JJA (ABFLUSS)</i>	32
TABELLE 13: <i>TRENDANALYSE DER HERBSTMONATE SON (ABFLUSS)</i>	33
TABELLE 14: <i>TRENDANALYSE DER WINTERMONATE DJF (ABFLUSS)</i>	33
TABELLE 15: <i>TRENDANALYSE DER JAHRESWERTE (TEMPERATUR)</i>	34
TABELLE 16: <i>TRENDANALYSE DER FRÜHJARHSMONATE MAM (TEMPERATUR)</i>	34
TABELLE 17: <i>TRENDANALYSE DER SOMMERMONATE JJA (TEMPERATUR)</i>	35
TABELLE 18: <i>TRENDANALYSE DER HERBSTMONATE SON (TEMPERATUR)</i>	35
TABELLE 19: <i>TRENDANALYSE DER WINTERMONATE DJF (TEMPERATUR)</i>	36
TABELLE 20: <i>METADATEN DER REGIONALEN KLIMAMODELLE CHRM, HIRHAM, RACMO UND REMO</i>	59

KARTENVERZEICHNIS

KARTE 1: <i>MESS-STATIONEN IM ÜBERBLICK (GRÖßERE ABBILDUNG DER KARTE IM ANHANG)</i>	11
KARTE 2: <i>MESS-STATIONEN UND HÖHENLAGE (GRÖßERE ABBILDUNG DER KARTE IM ANHANG)</i>	12
KARTE 4: <i>SAISONALE WASSERBILANZ</i>	17
KARTE 5: <i>ÜBERSICHT NIEDERSCHLAGSMESSSTATIONEN</i>	22
KARTE 6: <i>ÜBERSICHT ABFLUSSMESSSTATIONEN</i>	24
KARTE 7: <i>ÜBERSICHT TEMPERATURMESSSTATIONEN</i>	26
KARTE 8: <i>TRENDS DER SAISONALEN WASSERBILANZ</i>	38
KARTE 9: <i>SIMULATIONEN DER NIEDERSCHLAGSVERÄNDERUNGEN</i>	62
KARTE 10: <i>SIMULATIONEN DER ABFLUSSVERÄNDERUNGEN</i>	63
KARTE 11: <i>SIMULATIONEN DER TEMPERATURVERÄNDERUNGEN</i>	64

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Ziel der Arbeit ist es, Veränderungen hydroklimatologischer Variablen in der Großregion des Einzugsgebietes der Wiener Hochquellenleitungen festzustellen und Daten zu zukünftigen Klimaänderungen aufzubereiten. Für die Wiener Wasserwerke sind vor allem Entwicklungen der Wasserbilanz, der Extremwerte, insbesondere ein Anstieg von Dürre- oder Starkregenereignissen, und saisonale Schwankungen von großer Bedeutung um auch in Zukunft eine ausreichende Wasserversorgung sichern zu können.

Zunächst werden Langzeitreihen von Niederschlag, Temperatur und Abflüsse in der Region auf signifikante Trends untersucht. Dabei wird insbesondere auf Fragestellungen eingegangen, die für die Wiener Wasserwerke in ihrer Funktion als Wasserversorger für die Zukunft von besonderer Bedeutung sind, wie z. B. signifikante Veränderungen des saisonalen Niederschlag- oder Temperaturverhaltens. Die Untersuchung erfolgt auf Basis von Daten des Hydrographischen Landesdienstes der Steiermark und von Niederösterreich, dem Messnetz der Wiener Wasserwerke und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Als Kriterium zur Definition von Langzeitreihen wurde eine Mindestmessdauer von 50 Jahren vorausgesetzt, da nur über lange Zeit beobachtete Entwicklungen eine große Aussagekraft haben. Die längsten Zeitreihen im Untersuchungsgebiet reichen bis ins Jahr 1893 zurück.

Zur möglichen Entwicklung des regionalen Klimas werden Daten des Projekts „*PRUDENCE*“ (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects, Projekt-ID: EVK2-CT2001-00132) interpretiert und aufbereitet. Die Darstellung von zukünftigen Klimaszenarien basiert weiterhin auf globalen Klimamodellen, die als Primärquelle herangezogen werden, jedoch erhält man auf regionaler Ebene ein umso klareres Bild, je feiner die Auflösung des Modells ist (Christensen et al., 2007). Das *Prudence* Projekt hat zum Ziel, eine umfassende Datenbasis für regionale Klimaänderungsszenarien in der Zeit von 2071 bis 2100 für Europa zu erstellen (Prudence, 2005). Hierfür werden bereits vorhandene Modelle namhafter europäischer Klimaforschungsinstitute miteinander verglichen, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen. Die Daten von *Prudence* werden im Netz zum freien Download zur Verfügung gestellt. Diese regionalen Klimamodelle arbeiten mit einer sehr feinen regionalen Auflösung, die jedoch an den Rändern von supraskaligen, letztlich globalen Modellen angetrieben werden müssen (Schönwiese, 2003).

Kleinräumige Szenarien sind vor allem für politische Entscheidungsträger der Regional- und Bundespolitik von großer Bedeutung, da nur durch detaillierte Ergebnisse geeignete Maßnahmenpläne erstellt werden können.

2 DAS EINZUGSGEBIET DER WIENER HOCHQUELLENLEITUNGEN UND DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

Im folgenden Kapitel werden das Einzugsgebiet der Wiener Hochquellenleitungen und das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit beschrieben und klimatisch charakterisiert. Die herangezogenen Messstationen werden graphisch in Beziehung gesetzt und deren Lage analysiert und kritisch betrachtet.

2.1 DAS EINZUGSGEBIET DER WIENER HOCHQUELLENLEITUNGEN

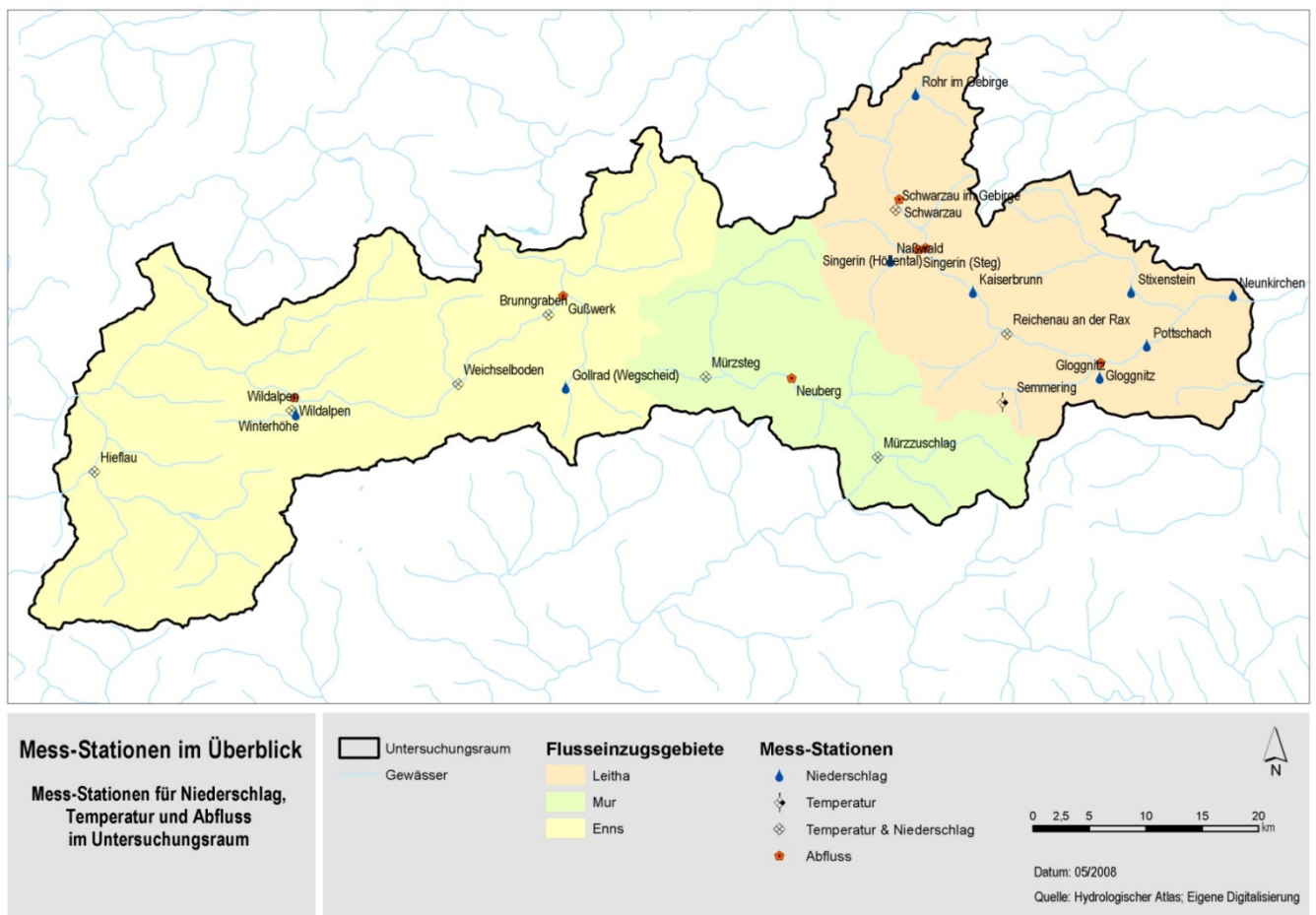
Das Einzugsgebiet der Wiener Hochquellenleitungen umfasst Teile der niederösterreichisch-steirischen Alpen. In Niederösterreich sind das die Rax, der Schneeberg und die Schneealpe, in der Steiermark befinden sich die Quellen im Hochschwabmassiv. Insgesamt umfassen die beiden Quellgebiete knapp 1 000 km².



Abbildung 1: Einzugsgebiet der Wiener Hochquellenleitungen (Quelle: Wiener Wasserwerke)

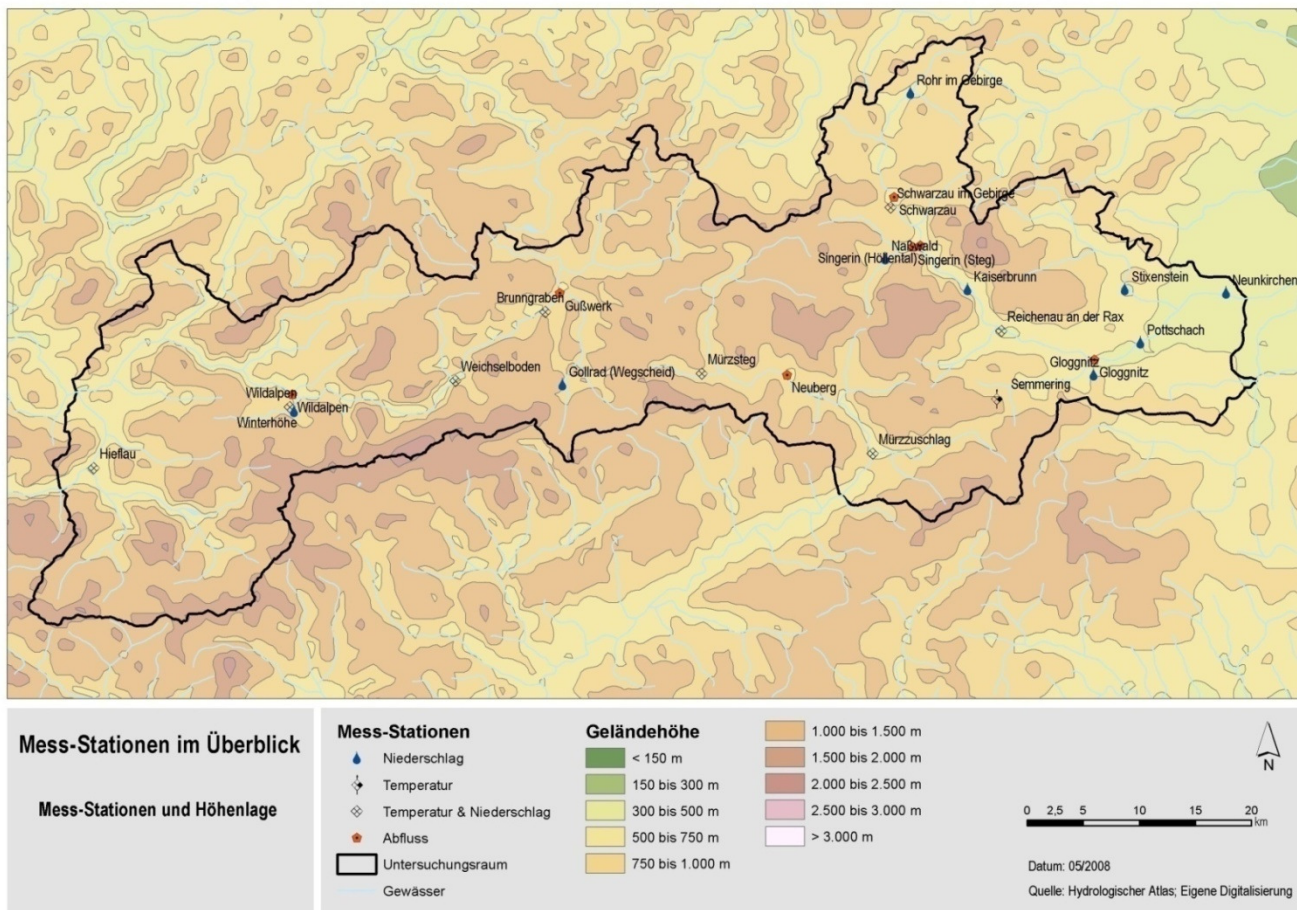
2.2 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit unterscheidet sich von diesen Quellgebieten, da es für eine hydroklimatologische Analyse sinnvoll ist, ein Gebiet mit natürlichen orographischen Einzugsgebietsgrenzen zu wählen. In diesem Fall wurde nach Teileinzugsgebieten der Enns, der Leitha und der Mur abgegrenzt. Es handelt sich hierbei um die Einzugsgebiete der Salza (Enns), der Schwarza (Leitha) und der Mürz (Mur). Aufgrund der zahlreichen Messstationen in diesem Gebiet konnte eine solide Datenbasis untersucht werden.



Karte 1: Mess-Stationen im Überblick (größere Abbildung der Karte im Anhang)

Neben der flächenhaften Verteilung der Messstationen spielt vor allem die hypsometrische Verteilung aufgrund des höhenabhängigen Klimas eine entscheidende Rolle. Die Karte „Mess-Stationen und Höhenlage“ zeigt die hypsometrische Gliederung des Untersuchungsgebietes. Das Gebiet liegt auf einer Höhe von 300 m ganz im Osten und knapp über 2 000 m am Schneeberg und am Hochschwab. Der größte Teil des Untersuchungsraumes befindet sich auf einer Höhenlage zwischen 750 m und 1500 m.



Karte 2: Mess-Stationen und Höhenlage (größere Abbildung der Karte im Anhang)

Im Folgenden werden die jeweiligen Niederschlagsmessstationen nach deren Höhenlage untergliedert.

Tabelle 1: Höhengliederung Niederschlagsmessstationen

Niederschlagsmessstationen							
Höhe in m	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000
Anzahl Stationen	1	5	1	7	1	1	1

Für die Niederschlagsverteilung gilt, dass dieser mit zunehmender Höhe steigt. Die höchstgelegene Station ist die in Gollrad mit 920 m ü. NN. Darunter liegen Müzzsteg und danach Brunngraben mit jeweils ca. 100 m Höhenunterschied. Zwischen 600 m und 700 m befindet sich knapp die Hälfte aller Stationen. Die andere Hälfte liegt zwischen 300 m und 600 m. Die Höhenlagen der einzelnen Stationen finden sich in Kap. 3.2.2.

Das Gebiet ist aufgrund der Tatsache, dass sich der größte Teil des Untersuchungsraumes auf einer Höhenlage zwischen 750 m und 1500 m befindet und mehr als drei Viertel aller Stationen unter diesem Niveau liegen, durch deren Messwerte nicht optimal erschlossen und repräsentativ. Jedoch ist es vor allem bei der Untersuchung von Langzeitreihen schwierig Daten aus höher gelegenen Stationen zu bekommen, da es erst seit jüngerer Zeit möglich ist, auch dort, trotz schwieriger Verhältnisse, zuverlässige Messdaten zu erfassen.

2.3 DAS KLIMA IM UNTERSUCHUNGSGEBIET

Zusätzlich zu der geographischen Lage ist vor allem auch die Zuordnung zu den jeweiligen Klimatypen besonders interessant. Wie in Abb. 2 ersichtlich handelt es sich bei dem Untersuchungsgebiet hauptsächlich um einen alpinen bzw. subalpinen Klimatyp. Der Alpine Klimatyp ist vor allem durch niedrige Temperaturen und besonders viel Niederschlag gekennzeichnet. Der Subalpine Klimatyp findet sich sehr häufig in den österreichischen Alpen. Er stellt eigentlich keinen eigenständigen Klimatyp dar, sondern ist eher ein Übergangstyp zwischen dem alpinen und den anderen Klimatypen. Die Temperaturwerte sind überall ähnlich und vor allem durch die Einflüsse der Seehöhe verursacht, die Niederschlagswerte aber differenzieren stark. Diese korrelieren deutlich mit den häufigsten Wetterlagen und der Luv- bzw. Leelage der Gebiete. Im Osten des Untersuchungsgebietes findet man einen Übergangsklimatyp zum pannonischen Klima, das durch milde Winter und sehr warme Sommer sowie wenig Niederschlag gekennzeichnet ist.

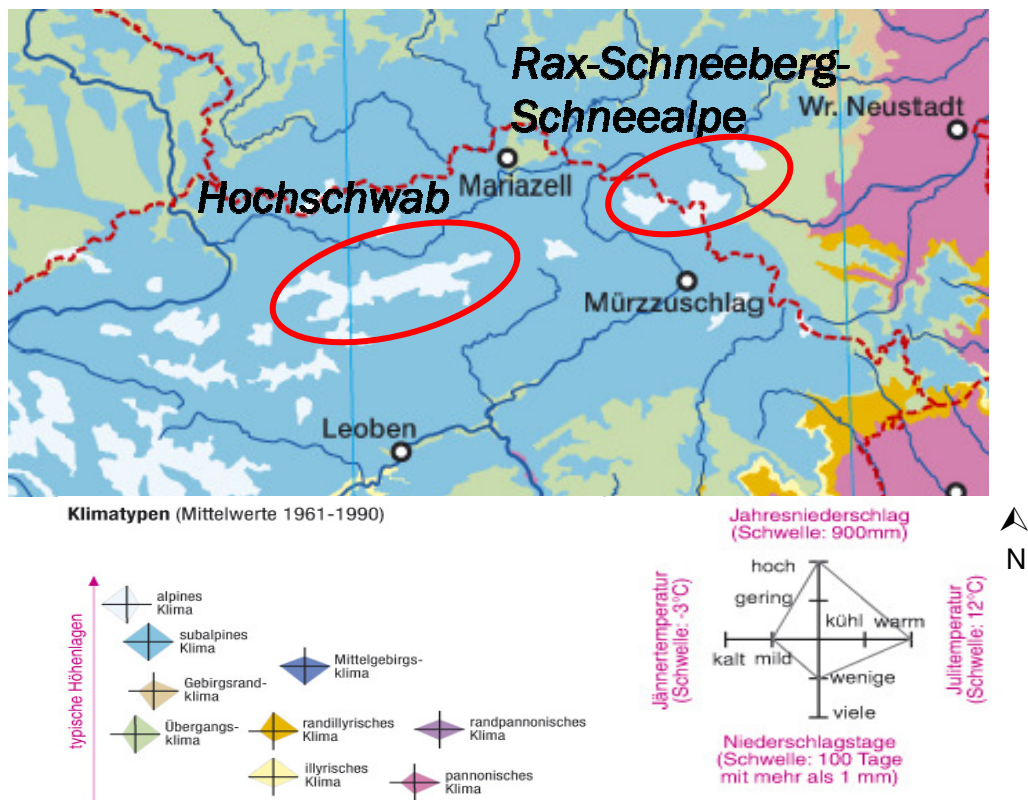


Abbildung 2: Klimatypenkarte, Maßstab 1 : 2 000 000 (Quelle: H. Hitz, L. Birsak, bearbeitet)

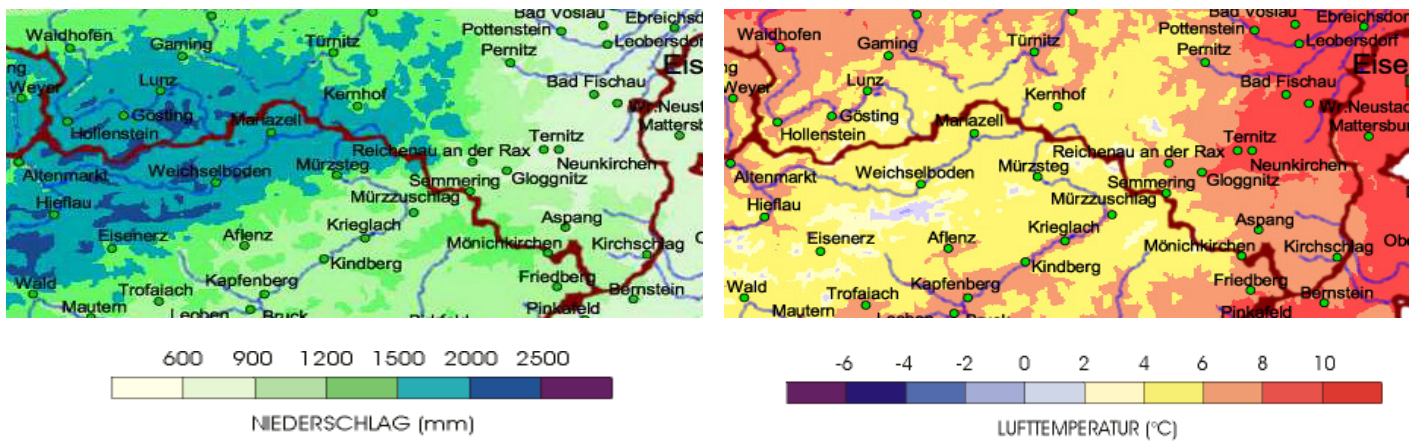


Abbildung 3: Niederschlags- bzw. Temperaturkarte (Quelle: ÖKLIM, ZAMG)

Die durchschnittliche Jahresniederschlagssummen betragen in dieser Region 1150 mm, wobei die höchsten Niederschlagswerte mit Werten bis knapp 2500 mm pro Jahr finden sich an der Nordseite des Hochschwabs dem sogenannten Nordstau. Dieses Gebiet ist stark durch NW-Wetterlagen beeinflusst und zeigt daher eine typische Verteilung der Niederschlagsmuster an der Luv- bzw. Leeseite des Gebirges. Es ist auch gut zu erkennen, dass der Niederschlag mit der Höhe des Gebirges zunimmt. Das orographische Einzugsgebiet der Mürz liegt im Regenschatten und weist 900 mm bis 1500 mm Jahresniederschlagssumme auf. Auch im Osten fällt weniger Niederschlag als im Einzugsgebiet der Salza und auf der Niederschlagskarte erkennt man auch sehr gut den Übergang zum pannonischen Klima durch die stetige Abnahme des Niederschlags hin zum Osten.

Die Temperatursituation ist stark durch den hypsometrischen Wandel geprägt, der ein Sinken der Temperatur mit der Höhe besagt. Die Jahresmitteltemperaturen bewegen sich um die 6 °C mit den höchsten Temperaturen mit bis zu 10 °C Jahresmitteltemperatur findet man im Osten, dem pannonischen Klimaraum. Am Gipfel des Hochschwabs hat es durchschnittlich lediglich -1 °C – -2 °C.

2.3.1 KLIMAKLASSIFIKATION NACH W. KÖPPEN

Der Klimaforscher Vladimir Köppen entwickelte um 1930 eine Klimaklassifikation, die auf Andauer, Schwellen und Grenzwerte thermischer und hydrischer Parameter basiert. Seine Klassifikation umfasst 24 Klimate, welche durch eine Klimaformel, die drei Buchstaben beinhaltet, beschrieben werden. Dabei gibt der erste Buchstabe die Klimazone, der zweite den Klimatyp und der dritte den Klimauntertyp an.

Je Orographisches Einzugsgebiet im Untersuchungsraum (Salza, Schwarza, Mürz) wurde hier eine Station ausgewählt und anhand eines Walter-Lieth-Diagramms graphisch dargestellt. Die Stationen Wildalpen und Mürzsteg befinden sich nach Köppen in der *borealen Klimazone* „D“, in der beide Jahreszeiten stark ausgeprägt vorhanden sind. Die Abgrenzung erfolgt nach thermischen Kriterien, wobei die Monatsmitteltemperatur des kältesten Monats unter -3°C liegt und die wärmste Monatsmitteltemperatur 10°C übersteigt. Reichenau an der Rax wird aufgrund der Temperaturmesswerte in eine Klimazone „C“, welche als *warmgemäßigte Regenklimate* bezeichnet wird, eingegliedert. Als Abgrenzungskriterium gilt eine Monatsmitteltemperatur des kältesten Monats zwischen 18°C und -3°C , die wärmste Monatsmitteltemperatur übersteigt 10°C .

Alle drei Stationen werden einem *immerfeuchten* Klimatyp zugeordnet, der mit einem „f“ als zweiten Buchstaben in der Klimaformel gekennzeichnet wird. Die Niederschlagsschwankungen sind eher gering.

Die Stationen Wildalpen und Reichenau an der Rax fallen bei den Klimauntertypen in

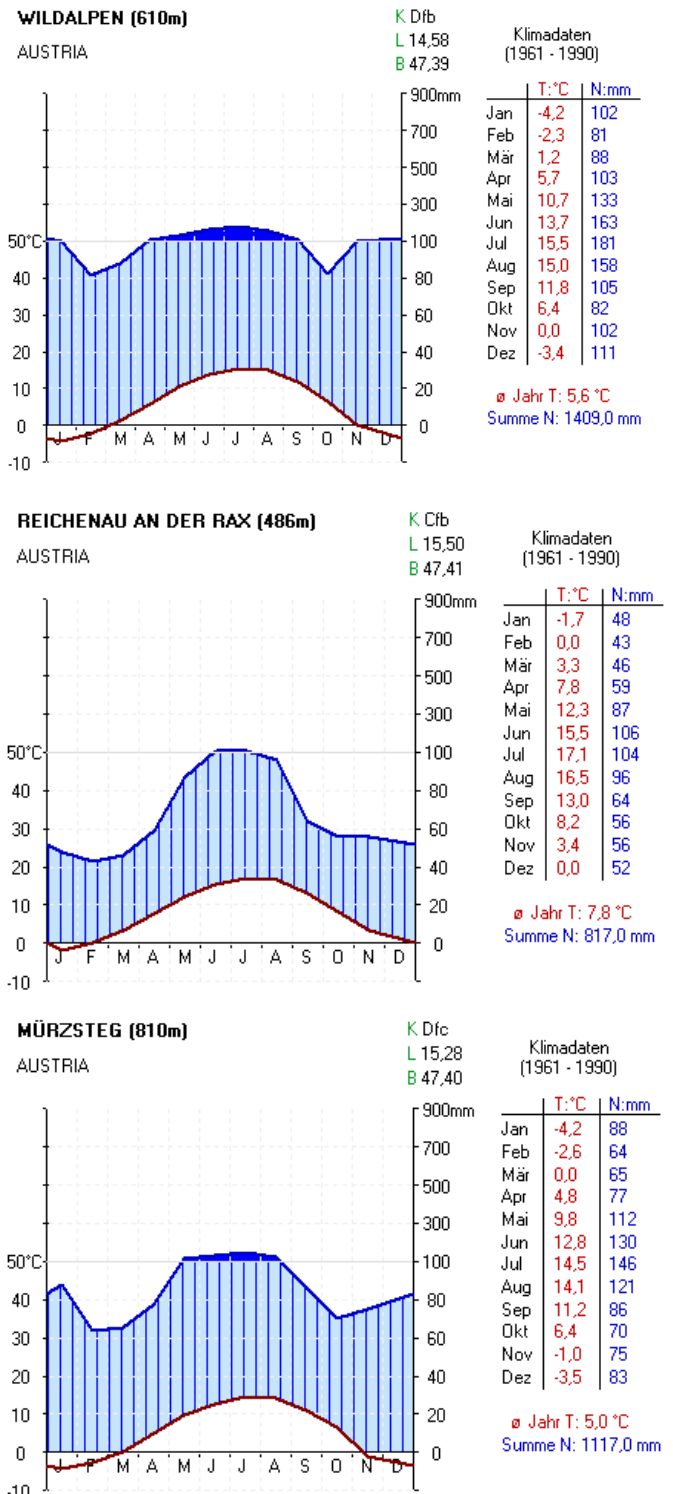


Abbildung 4: Walter-Lieth Diagramme der Stationen Wildalpen, Reichenau und Mürzsteg (Quelle: Datenquelle HZB, verwendete Software: „Klimastation“ von Djekic, Z.)

die Kategorie „b“, welche als *warmer Sommer* bezeichnet wird. In Mürzsteg gibt es nach Köppen einen *kurzen Sommer* („c“). In der Kategorie „b“ sind die Abgrenzungskriterien ein wärmstes Monatsmittel unter 22 °C, jedoch mindestens vier Monatsmittel über 10 °C. Für eine Klimauntertypenkategorie „c“ müssen der wärmste Monat über 10 °C und der kälteste über -38 °C aufweisen (Djekic, 2001).

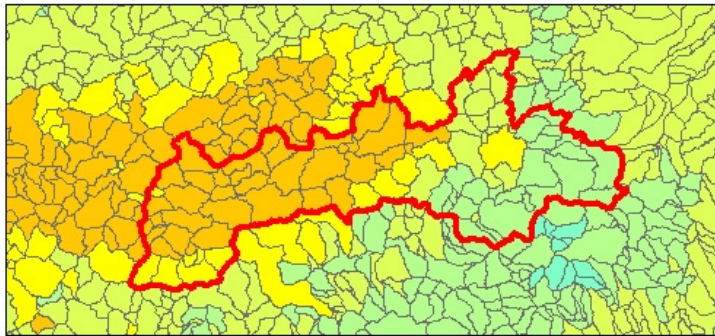
Bei der Betrachtung dieser drei Stationen kommt der hypsometrische Klimawandel deutlich zum Ausdruck. Die etwas höher gelegenen Stationen weisen neben höheren Niederschlagswerten auch niedrigere Temperaturen auf, weshalb sie in andere Klimazonen eingeordnet werden.

2.4 DIE WASSERBILANZ IM UNTERSUCHUNGSGEBIET

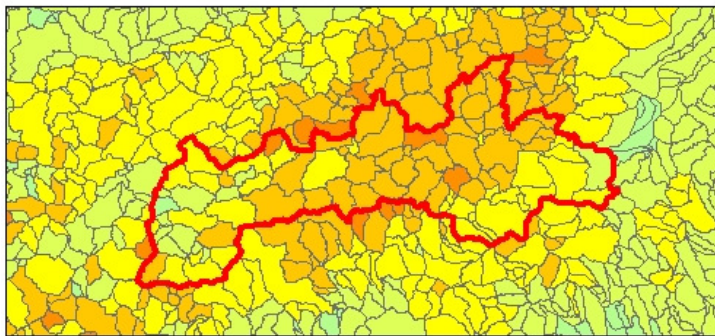
Die Wasserbilanz besteht aus den hydroklimatologischen Hauptkomponenten Niederschlag, Temperatur, Verdunstung und Abfluss, sowie einer Speicherkomponente, die über bestimmte Zeiträume bilanziert werden können. Sie weisen über das Jahr keine gleichmäßige Verteilung auf, sondern zeigen eine deutlich ausgeprägte Saisonalität. Während über das Jahr gesehen der Speicher von Wasser vernachlässigt werden kann, spielt er bei der saisonalen Betrachtung eine bedeutende Rolle. So wird der Speicher durch den jährlichen Auf- und Abbau einer Schneedecke als auch durch Veränderungen der Bodenfeuchte und des Grundwassers erheblich beeinflusst. Vor allem der Abfluss erfährt durch die Schneedecke eine zeitliche Verlagerung in das Frühjahr. Auch die Verdunstung zeigt eine ausgeprägte Saisonalität durch den unterschiedlichen Energieeintrag im Sommer und im Winter. Die höheren Niederschlagsmengen im Sommer tragen zusätzlich zur saisonalen Unausgewogenheit bei (Fürst et al., 2007).

Die folgenden Karten zur saisonalen Änderung der Wasserbilanz zeigen deutlich negative Wasservorräte im Frühjahr sowie im Sommer und eine hohe Speicherung im Herbst sowie im Winter, wobei die Differenzen zwischen Sommer und Winter am offensichtlichsten zu erkennen sind. Die Amplitude zwischen Sommer und Winter ist im Bereich der Alpen am höchsten, da durch eine länger andauernde geschlossene Schneedecke im Winter mehr Speichervermögen vorhanden ist als in flacheren, wärmeren Gebieten. Hier steht ein Speicher von 500 mm – 1000 mm im Winter einer negativen Bilanz mit bis zu – 500 mm gegenüber. Im Osten des Untersuchungsgebietes ist die saisonale Wasserbilanz deutlich ausgewogener. Im Frühling ist die negative Speicheränderung hauptsächlich in den höher gelegenen Regionen stark ausgeprägt, da dort mehr gespeichertes Wasser vorhanden war. Der Herbst zeigt eine relativ ausgeglichene Wasserbilanz bis hin zu leicht positiven Speicheränderungen.

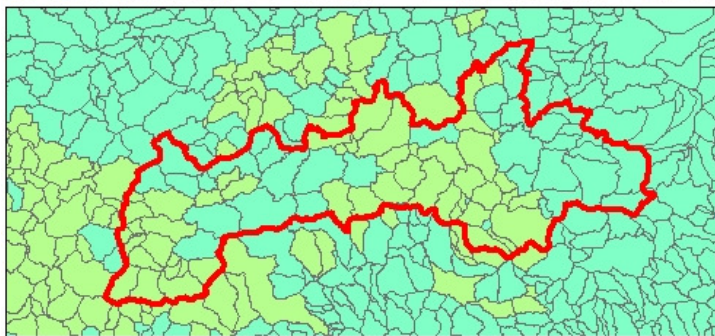
Die Betrachtung der saisonalen Unterschiede der Wasserbilanz zeigt die stark ausgeprägten Änderungen der Wasserbilanz im Untersuchungsraum im Jahresverlauf klar auf und stellt eine wichtige Grundlage für wasserwirtschaftliche Planungen dar.



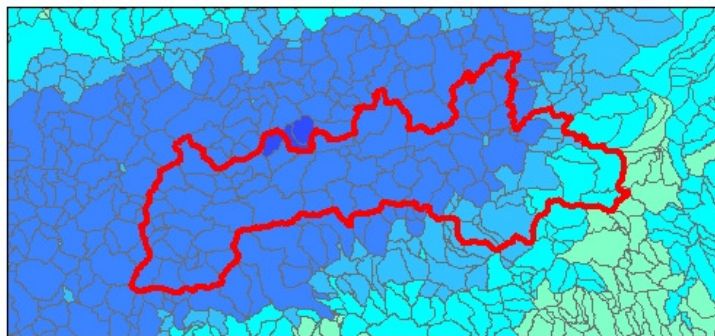
**Saisonale Wasserbilanz
Frühling**



**Saisonale Wasserbilanz
Sommer**




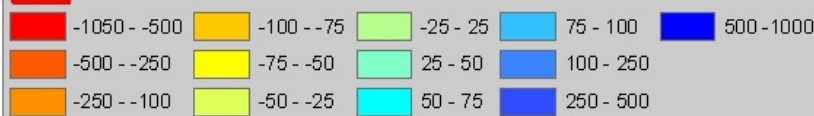
**Saisonale Wasserbilanz
Herbst**



**Saisonale Wasserbilanz
Winter**

**Saisonale Wasserbilanz -
Änderung des Wasservorrats in mm**

 Untersuchungsraum



0 5 10 20 30 40 50 km



Datum: 6/2008
Quelle: Hydrologischer Atlas
Eigene Digitalisierung

Karte 3: Saisonale Wasserbilanz

3 HYDROKLIMATOLOGISCHE ANALYSE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES

In diesem Kapitel werden hydroklimatologische Parameter wie der Gebietsniederschlag, Abflüsse und Temperaturwerte untersucht, um mögliche Trends in der Vergangenheit zu detektieren. Unter Heranziehen eines statistischen Tests wird die Signifikanz möglicher Tendenzen überprüft. Da für diese Arbeit nicht nur Veränderungen der Jahresmittelwerte von Bedeutung sind, werden die Daten zusätzlich saisonal aufgesplittet und jeweils auf Trends untersucht. Zunächst wird die methodische Vorgangsweise erläutert, um dann einen genauen Überblick über die Datenbasis zu geben. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der Analyse übersichtlich dargestellt und zuletzt interpretiert.

3.1 METHODIK

3.1.1 ZEITREIHENANALYSE

Unter dem Begriff „*Zeitreihe*“ versteht man ein Datenkollektiv von einem Umfang n , deren numerische Werte sich auf diskrete Zeiten beziehen. Zur Bearbeitung der folgenden Daten wird ein konstanter Zeitschritt ($\Delta t = t_{i+1} - t_i$) verwendet (Schönwiese, 2000). Es handelt sich somit um äquidistante Zeitreihendaten.

Bei Zeitreihen sind verschiedene Arten zu unterscheiden, wobei die hier verwendeten Temperatur- und Abflussdaten zeitliche Mittelwerte darstellen, die aus den real vorliegenden Werten für einen Zeitintervall Δt errechnet werden. Die Niederschlagswerte stellen Summen einer Zeitspanne dar.

Es wird angenommen, dass sich eine Zeitreihe aus einer deterministischen und einer stochastischen (das Rauschen) Komponente zusammensetzt. Die Hypothese besagt, dass eine Zeitreihe aus

- einem *Trend*,
- einem *periodischen* und einem
- *stochastischen* (Zufalls-) Anteil

besteht. Ziel ist es, einen Trend, der wie eben beschrieben, durch das Rauschen beeinflusst wird, zu detektieren. Die Wahrscheinlichkeit, einen Trend korrekt zu bestimmen, ist von mehreren Faktoren abhängig. Zunächst ist die Größe des Trends von erheblicher Bedeutung, da sie andere Komponenten überlagern kann, wenn diese ein gewisses Ausmaß erreicht. Die Länge der Zeitreihe bzw. die Anzahl der verfügbaren Messwerte spielt ebenso eine bedeutende Rolle bei der Bestimmung eines Trends. Des Weiteren kommen noch das *Rauschen* und andere statistische Eigenschaften wie z. B. die Varianz zum Tragen.

Unter den beschriebenen Voraussetzungen und der Tatsache, dass, wenn ein Trend bei der statistischen Analyse der Daten vorkommt, dieser ein relativ geringes Ausmaß erreichen wird, mit einigen Schwierigkeiten zu rechnen ist. Meteorologische und hydrologische Zeitreihen unterliegen nicht, wie bei den meisten statistischen Tests gefordert, einer Normalverteilung. Es muss also auf parameterfreie Verfahren zurückgegriffen werden. Weiters sind diese Art der Daten nicht unabhängig voneinander. (Aufeinander folgende Niederschlagsereignisse können nicht getrennt voneinander betrachtet werden!)

Es wird also in Folge der verteilungsunabhängige Vorzeichen-Trendtest nach Cox und Stuart (Sachs, 2002) verwendet. Dabei ist zu beachten, dass dieser lediglich ein qualitatives Ergebnis liefert. Die Signifikanz des Trends wird bestimmt. Zur Quantifizierung der Entwicklungen wird der Trend einer linearen Regression berechnet.

3.1.2 VORZEICHEN-TRENDTEST NACH COX UND STUART

Für die Prüfung einer Zeitreihe auf Trendänderungen wird hier der Vorzeichen-Trendtest nach Cox und Stuart (Sachs, 2002) verwendet. Dabei werden die n Werte einer Reihe in drei Gruppen geteilt. Die erste und die dritte Gruppe enthalten mit $n' = n/3$ gleich viele Messwerte. Wird eine Reihe untersucht, die nicht durch drei teilbar ist, so reduziert man das mittlere Drittel um ein oder zwei Werte.

Zur Trendermittlung vergleicht man jeweils eine Beobachtung des ersten Drittels mit der entsprechenden Beobachtung des letzten Drittels der Messreihe. Bei einer positiven Differenz, also einem aufsteigenden Trend, wird ein „Plus“ markiert, bei einer negativen ein „Minus“. Die Signifikanz des ermittelten Trends lässt sich mit einem Prüfwert \hat{z} abschätzen.

$$\hat{z} = \frac{|S - n/6|}{\sqrt{n/12}}$$

\hat{z} Prüfwert

S Summe der Pluszeichen

In diesem Fall wurde die Irrtumswahrscheinlichkeit (α) zweiseitig auf dem 5 %-Niveau getestet und es gilt somit die Schranke von $z = 1,96$. Ein zweiseitiger Test wird dann gewählt, wenn keine begründete Hypothese der Richtung des Trends vorliegt. Bei einer Nullhypothese ($H_0: \mu_1 = \mu_2$) können also zwei

Alternativhypothesen in Frage kommen. Es ergibt sich eine $H_{A1} (\mu_1 > \mu_2)$ und eine $H_{A2} (\mu_1 < \mu_2)$ (Sachs, 2002).

Für die Durchführung des Tests wurden Niederschlagssummen bzw. Abfluss- und Temperaturmittelwerte verwendet.

3.1.3 LINEARE REGRESSION

Zur Quantifizierung der Trends wird eine Regressionsanalyse herangezogen, bei der die beobachteten Werte einer Regressionsgleichung angepasst werden. Setzt man die Gleichung einer Geraden ($Y = \alpha + \beta X$) voraus, so spricht man von einer linearen Regression. Dabei wird Y als die abhängige und X als die unabhängige Variable bezeichnet (Sachs, 2002). Die Ermittlung der Beziehungsgleichung geschieht nach der „Methode der kleinsten Quadrate“. Das bedeutet, dass die quadratischen Abweichungen der Ausgangsdaten von den entsprechenden Funktionswerten der Regressionsgleichung minimal sind (Schönwiese, 2000). Obwohl die Anwendung dieser Methode eine Normalverteilung der Stichproben und eine Datenunabhängigkeit untereinander voraussetzt, wird sie hier bewusst der Anschaulichkeit wegen verwendet.

3.2 DATENBASIS

Die für die Analyse benötigten Daten wurden von verschiedenen Quellen bezogen, um das Gebiet durch eine größtmögliche Datendichte ausreichend bearbeiten zu können. Im Untersuchungsgebiet befinden sich Messstationen der Hydrographischen Landesdienste der Länder Niederösterreich und Steiermark, der Wiener Wasserwerke und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Für einige Stationen mussten für die notwendigen Langzeitreihen Hydrographische Jahrbücher herangezogen und die Daten erst digitalisiert werden. In der Fachbereichsbibliothek Wasserwirtschaft/Hydrologie der Universität für Bodenkultur können diese Jahrbücher ab dem Jahr 1893 eingesehen werden.

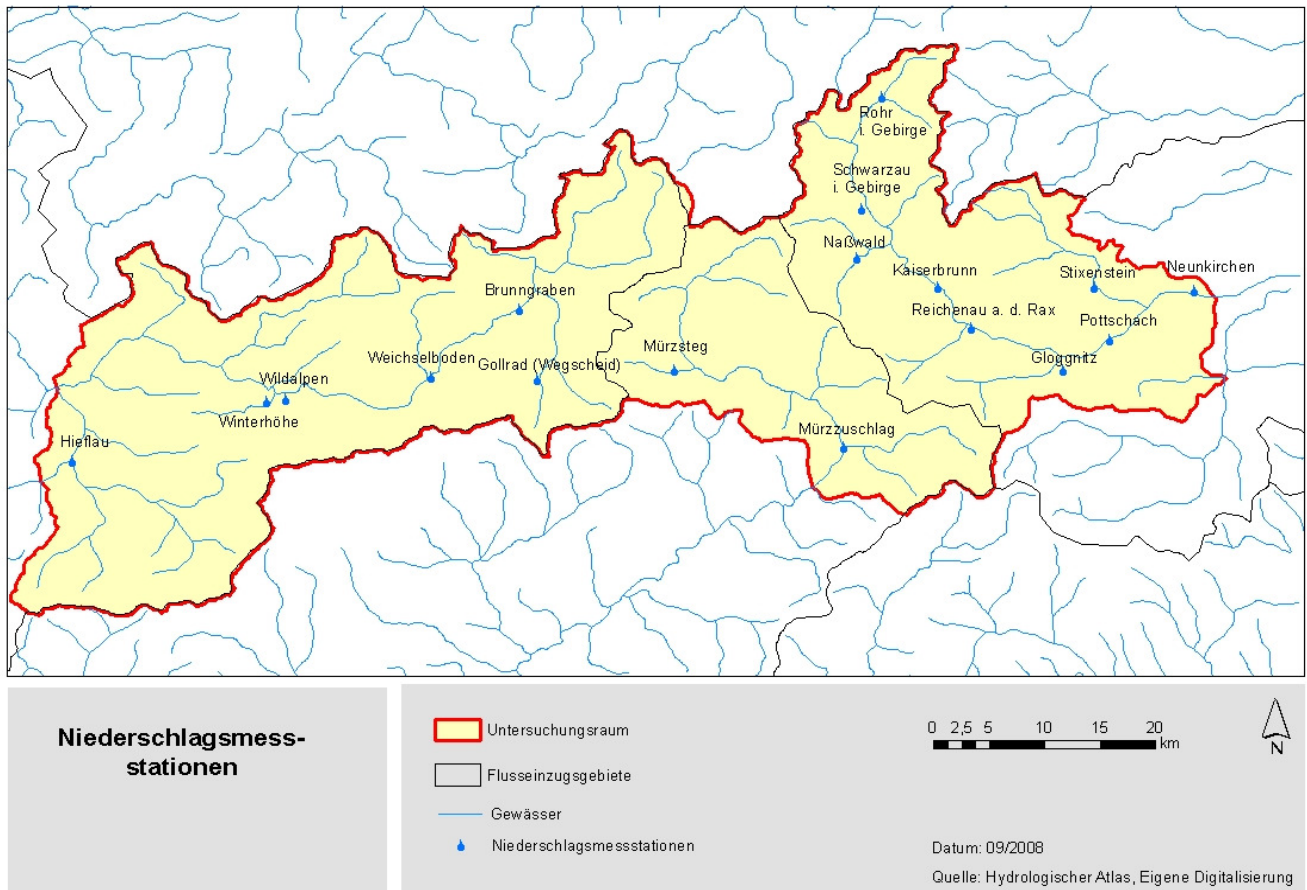
3.2.1 DIE NIEDERSCHLAGSMESSSTATIONEN

Im Folgenden werden die Metadaten der Niederschlagsmessstationen tabellarisch dargestellt. Neben dem Stationsnamen, der geographischen Koordinaten und der Seehöhe sind auch Informationen über die Länge der Messreihe, die Anzahl der Messwerte sowie deren Quellen zu entnehmen. Aufgrund der Datenverfügbarkeit stimmt die Messreihe mit der Anzahl der Messwerte meist nicht überein.

Die Anzahl der Stationen und die Länge der Zeitreihen, die an vielen Messstationen bis über hundert Jahre zurückreichen, stellen eine solide Datenbasis dar, die eine große Aussagekraft der Analysen zulässt.

Tabelle 2: Metadaten der Niederschlagsmessstationen

Station	Geographische Koordinaten		Höhe ü. NN	Messreihe	Anzahl Messwerte	Quelle(n)
	Länge	Breite				
1.1 Brunngraben	15° 17' 18"	47° 43' 35"	710 m	1942-2004	58	1942 -1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD Stmk
1.2 Gloggnitz	15° 55' 46 "	47° 40' 29"	475 m	1951-2004	53	1951-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD NÖ
1.3 Gollrad	15° 18' 28"	47° 39' 03"	920 m	1895-2004	91	1895-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD Stmk
1.4 Hieflau	14° 45' 00"	47° 36' 00"	492 m	1896-2001	85	1896-1953 Hydr. Jahrbuch
						1954-2001 ZAMG
1.5 Kaiserbrunn	15° 47' 33"	47° 44' 09"	559 m	1893-2004	110	1893-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD NÖ
1.6 Mürzsteg	15° 28' 21"	47° 40' 25"	810 m	1893-2004	105	1893-1953 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD Stmk
1.7 Mürz-zuschlag	15° 40' 23"	47° 36' 20"	660 m	1893-2007	96	1893-1947 Hydr. Jahrbuch
						1948-2007 ZAMG
1.8 Naßwald	15° 41' 42"	47° 45' 44"	615 m	1893-2004	110	1893-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD NÖ
1.9 Neunkirchen	16° 06' 00"	47° 43' 35"	362 m	1893-2004	103	1893-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD NÖ
1.10 Pottschach	15° 59' 43"	47° 41' 17"	411 m	1893-2004	108	1893-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD NÖ
1.11 Reichenau	15° 50' 12"	47° 41' 59"	486 m	1893-2004	105	1893-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD NÖ
1.12 Rohr im Gebirge	15° 43' 51"	47° 53' 41"	673 m	1896-2004	103	1896-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD NÖ
1.13 Schwarza u. i. Gebirge	15° 42' 11"	47° 48' 12"	612 m	1893-2004	97	1893-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD NÖ
1.14 Stixenstein	15° 58' 48"	47° 43' 53"	454 m	1893-2004	107	1893-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD NÖ
1.15 Weichselboden	15° 10' 45"	47° 40' 22"	680 m	1896-2004	97	1896-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD Stmk
1.16 Wildalpen	14° 58' 54"	47° 39' 18"	610 m	1896-2004	85	1896-1960 Hydr. Jahrbuch
						1961-2004 HD Stmk
1.17 Winterhöhe	14° 59' 00"	47° 39' 14"	665 m	1947-2007	60	1947-2007 Wr. Wasserwerke



Karte 4: Übersicht Niederschlagsmessstationen

Die Datensätze sind leider nicht lückenlos, was bei der Analyse der Messwerte und der Interpretation der Daten zu berücksichtigen ist. Die fehlenden Werte konnten hier nicht ersetzt werden. Vor allem in den Jahren der beiden Weltkriege sind große Mengen an Daten verloren gegangen, bzw. konnten keine Aufzeichnungen vorgenommen werden. Bei den nachfolgenden statistischen Tests wurden die Lücken in den Zeitreihen ausgelassen um nicht fälschlicher Weise Nullwerte in die Statistik einfließen zu lassen, die diese beeinflussen würde.

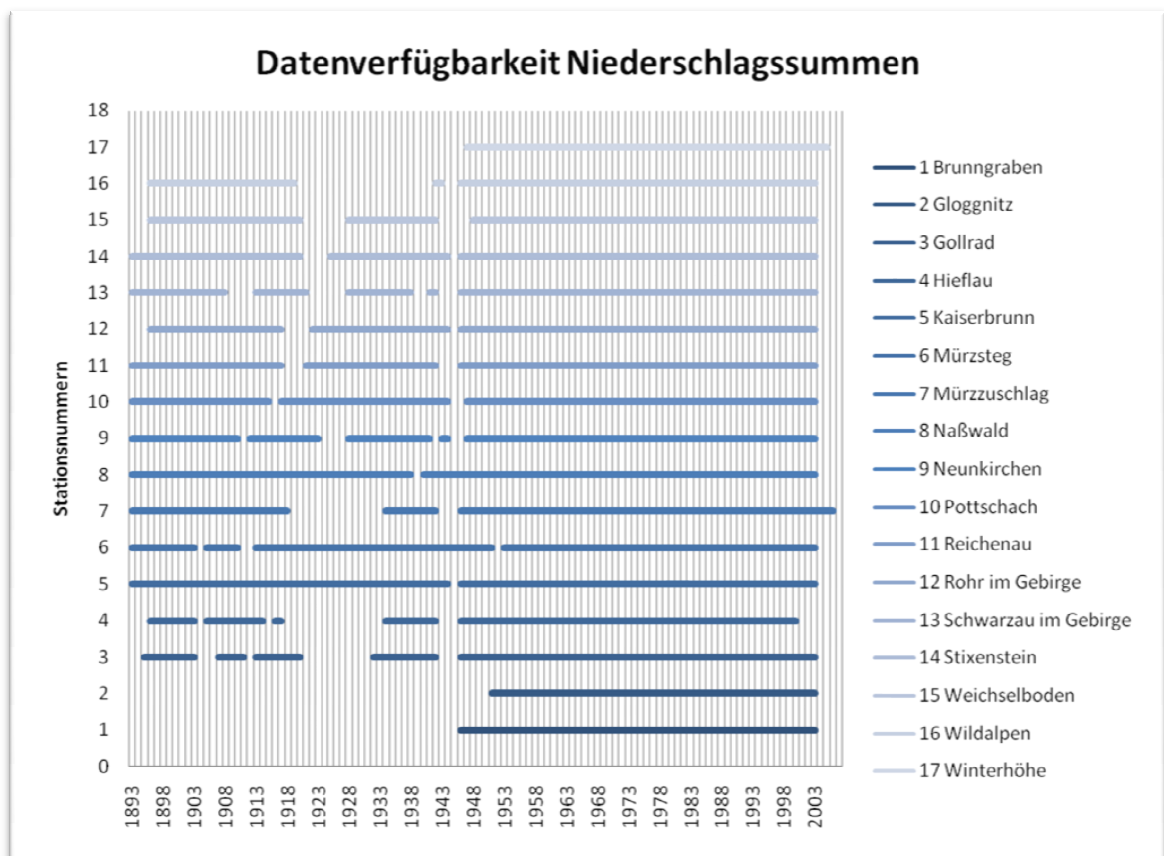


Abbildung 5: Datenverfügbarkeit der Niederschlagsmessstationen

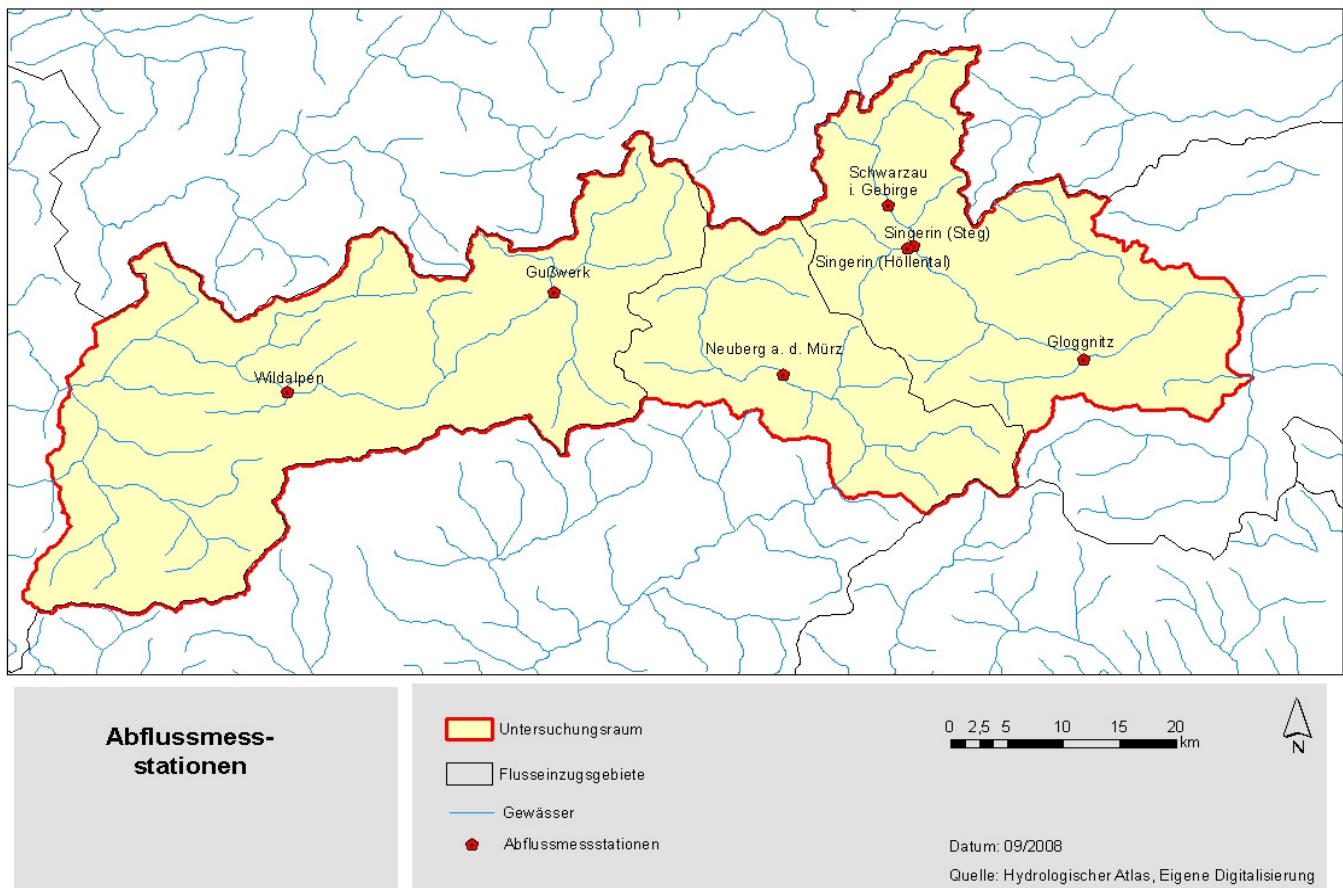
3.2.2 DIE ABFLUSSMESSSTATIONEN

Der Abfluss ist als das Wasservolumen definiert, das pro Zeiteinheit einen Fließquerschnitt passiert. Die Entwicklungen der Abflussganglinie sind von großer Bedeutung, da sie Aufschluss über die hydrologische Gesamtreaktion eines Wassereinzugsgebietes auf Niederschläge und Verdunstung geben (Zepp, 2002). Im Gegensatz zu den Niederschlagsmessreihen sind die Abflussreihen (m^3/s) mit durchschnittlich nur 45 Jahren erheblich kürzer. Obwohl an einigen Pegeln im Untersuchungsgebiet schon ab Ende des 19. Jahrhunderts Wasserstandsmessungen vorgenommen wurden, werden sie hier nicht herangezogen, weil die benötigten Umrechnungskurven von cm Wasserstand auf Abflusswerte in m^3/s nicht zur Verfügung standen. Erst ab Mitte des 20. Jahrhunderts werden Abflussmessungen standardisiert und chronologisch durchgeführt.

Die folgende Tabelle zeigt die herangezogenen Messstellen, deren geographische Lage, die Länge der Messreihe, das betreffende Gewässer und das orographische Einzugsgebiet.

Tabelle 3: Metadaten der Abflussmessstationen

Messstelle	Geographische Koordinaten		Höhe ü. NN	Messreihe	Gewässer	Orograph. Einzugsgebiet
	Länge	Breite				
2.1 Gloggnitz	15° 56' 22"	47° 40' 38"	435 m	1948-2005	Schwarza	472,2 km ²
2.2 Gußwerk	15° 18' 20"	47° 44' 30"	735 m	1965-2005	Salza	280,0 km ²
2.3 Neuberg a. d. Mürz	15° 34' 24"	47° 40' 14"	731 m	1951-2005	Mürz	231,5 km ²
2.4 Schwarza	15° 42' 29"	47° 48' 40"	602 m	1967-2005	Schwarza	128,4 km ²
2.5 Singerin (Höllental)	15° 44' 09"	47° 46' 17"	569 m	1951-2005	Schwarza	252,3 km ²
2.6 Singerin (Steg)	15° 43' 38"	47° 46' 17"	577 m	1967-2005	Naßbach	80,0 km ²
2.7 Wildalpen	14° 59' 02"	47° 39' 55"	583 m	1951-2005	Salza	592,3 km ²



Karte 5: Übersicht Abflussmessstationen

3.2.3 DIE TEMPERATURMESSSTATIONEN

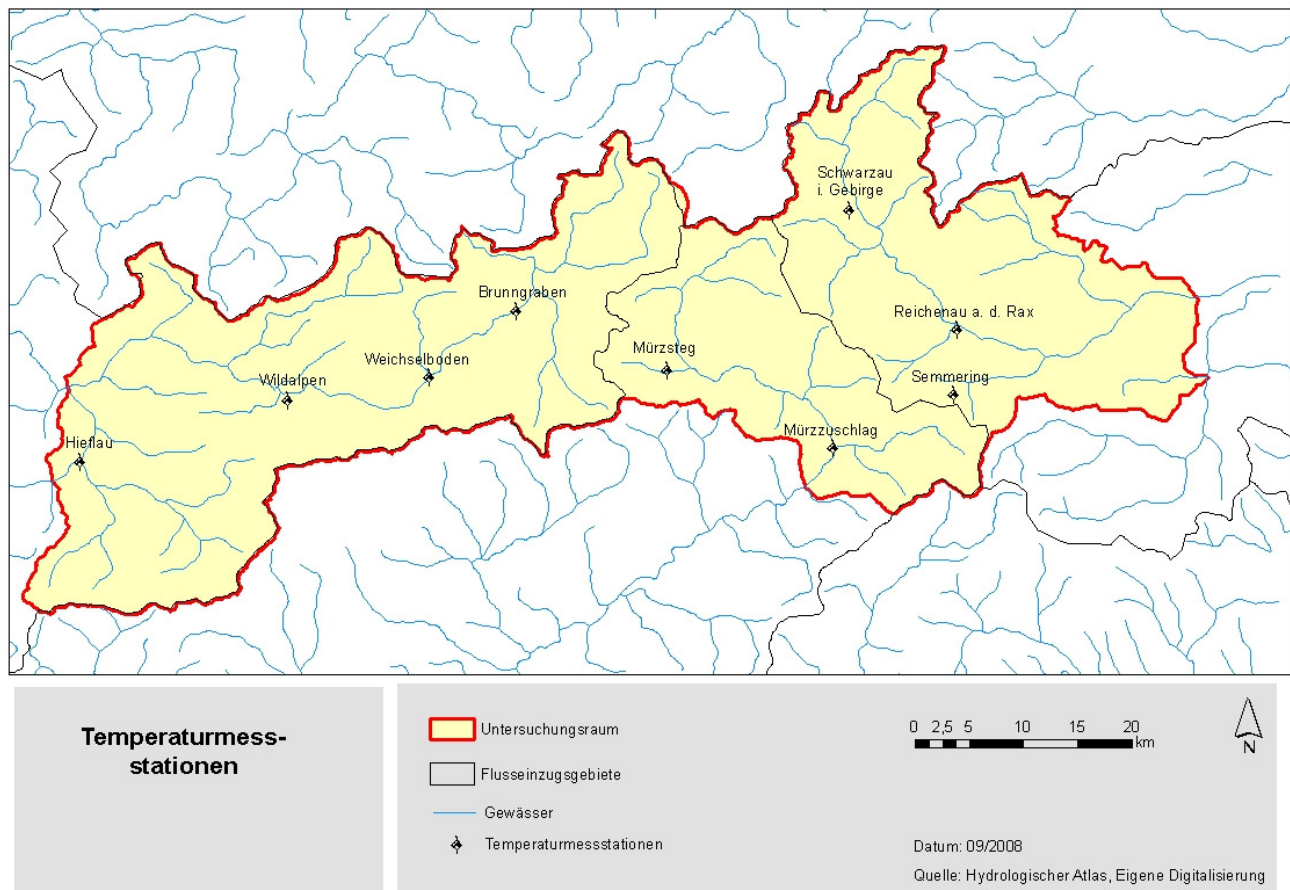
Von den verfügbaren Temperaturmessstationen im Untersuchungsgebiet konnten viele nicht herangezogen werden, da sie zu große Lücken aufweisen und daher nicht für die Analyse geeignet sind. Die Temperaturentwicklung wurde

also hier anhand von neun Stationen beobachtet. Die absoluten Daten können untereinander nicht immer verglichen werden, da die Datensätze der Wiener Wasserwerke 7:00 Uhr Werte enthalten, was bedeutet, dass die Temperatur täglich zur gleichen Zeit, hier um 7:00 Uhr aufgezeichnet wurde. Die Datensätze des Hydrographischen Dienstes der Länder Niederösterreich und Steiermark, sowie die aus den Hydrographischen Jahrbüchern und der ZAMG hingegen stellen jeweils gemittelte Werte eines Monats oder eines Tages dar. Die Entwicklungen der Temperatur können jedoch untereinander verglichen werden.

Die Lage der Temperaturmessstationen, die Länge der Messreihe, die Art der Daten und die Datenquellen können aus folgender Tabelle entnommen werden.

Tabelle 4: Metadaten der Temperaturmessstationen

<i>Messstelle</i>	<i>Geographische Koordinaten</i>		<i>Höhe ü. NN</i>	<i>Messreihe</i>	<i>Daten</i>	<i>Quelle(n)</i>
	<i>Länge</i>	<i>Breite</i>				
3.1 Brunngraben	15° 17' 10"	47° 43' 36"	730 m	1947-2006	7 Uhr Werte	Wr. Wasserwerke
3.2 Hieflau	14° 45' 00"	47° 36' 00"	492 m	1925-2006	Monatsmittel	HD Stmk
3.3 Mürzsteg	15° 28' 21"	47° 40' 25"	810 m	1911-2006	Monatsmittel	HD Stmk
3.4 Mürzzuschlag	15° 40' 23"	47° 36' 20"	660 m	1948-2007	Tagesmittel	ZAMG
3.5 Reichenau	15° 50' 12"	47° 41' 59"	486 m	1896-2006	Monatsmittel	1896-1901 Hydr. Jahrbuch 1901-2006 HD NÖ
3.6 Schwarzau	15° 42' 11"	47° 48' 12"	612 m	1896-1998	Monatsmittel	1896-1901 Hydr. Jahrbuch 1901-1998 HD NO
3.7 Semmering	15° 49' 42"	47° 38' 10"	985 m	1901-1971	Monatsmittel	HD NÖ
3.8 Weichselboden	15° 10' 45"	47° 40' 22"	680 m	1949-2007	7 Uhr Werte	Wr. Wasserwerke
3.9 Wildalpen	14° 58' 54"	47° 39' 18"	610 m	1956-2006	Monatsmittel	HD Stmk



Karte 6: Übersicht Temperaturmessstationen

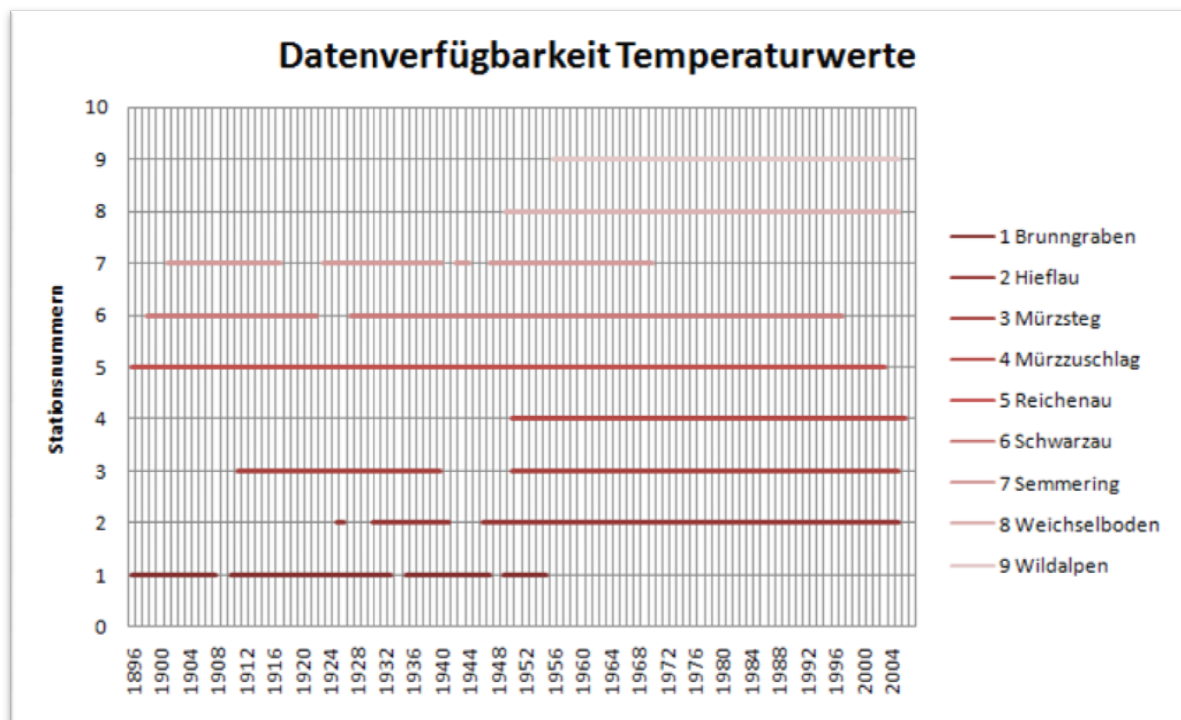


Abbildung 6: Datenverfügbarkeit Temperaturwerte

Wie bei den Messwerten der Niederschlagsstationen sind auch die der Temperaturwerte nicht lückenlos. Um Fehler bei der Interpretation der Daten zu vermeiden sind die fehlenden Werte zu berücksichtigen und in Abbildung 6 aufgezeigt.

3.3 ANWENDUNG

In diesem Kapitel werden die Langzeitreihen von Niederschlag, Abfluss und der Temperatur auf mögliche signifikante Änderungen der Jahresmittel bzw. Jahressumme und saisonale Entwicklungen untersucht. Zunächst wurden die jeweiligen Jahreswerte bzw. die auf vier Saisons aufgesplitteten Daten mit dem Cox-Stuart Trendtest analysiert, um einen ersten Überblick zu bekommen. Danach folgt eine Quantifizierung der einzelnen Trends.

3.3.1 TRENDS IM NIEDERSCHLAG

Da davon ausgegangen wird, dass sich in der Entwicklung der Jahressummen kaum signifikante Trends erkennen lassen, wird auch eine Analyse der vier Jahreszeiten durchgeführt. Dazu wird das Jahr in MAM (März, April, Mai), JJA (Juni, Juli, August), SON (September, Oktober, November) und DJF (Dezember, Jänner, Februar) unterteilt. Die saisonalen Veränderungen der Niederschlagssummen wirken sich vor allem auf die Verfügbarkeit von Trinkwasser aus.

Tabelle 5: Trendanalyse der Jahreswerte (Niederschlag)

<i>Jahreswerte</i>					
<i>Station</i>	<i>z</i>	<i>P</i>	<i>Trend</i>	<i>Zeitreihe</i>	<i>mm/Jahr</i>
<i>Brunngraben</i>	1,06	> 0,05	insign.	1946-2004	+2,01
<i>Gloggnitz</i>	-0,87	> 0,05	insign.	1951-2004	-0,44
<i>Gollrad</i>	-1,71	> 0,05	insign.	1895-2004	-0,59
<i>Hieflau</i>	-1,53	> 0,05	insign.	1896-2002	-1,89
<i>Kaiserbrunn</i>	0,82	> 0,05	insign.	1893-2004	+1,36
<i>Mürzsteg</i>	0,69	> 0,05	insign.	1893-2004	+1,85
<i>Mürzzuschlag</i>	3,53	< 0,05	steigend	1893-2006	+4,07
<i>Naßwald</i>	-0,82	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,91
<i>Neunkirchen</i>	-3,18	< 0,05	fallend	1893-2004	-1,48
<i>Pottschach</i>	-1,67	> 0,05	insign.	1893-2004	-1,09
<i>Reichenau</i>	-0,34	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,26

<i>Rohr im Gebirge</i>	0,35	> 0,05	insign.	1896-2004	-0,15
<i>Schwarzau im Gebirge</i>	2,27	< 0,05	steigend	1893-2004	+3,26
<i>Stixenstein</i>	-4,46	< 0,05	fallend	1893-2004	-3,56
<i>Weichselboden</i>	-0,56	> 0,05	insign.	1896-2004	-0,53
<i>Wildalpen</i>	-1	> 0,05	insign.	1896-2004	+0,04
<i>Winterhöhe</i>	-1,34	> 0,05	insign.	1947-2007	-2,56

Die Analyse zeigt, dass nur bei vier von siebzehn Stationen ein signifikanter Trend vorhanden ist. Auch die Richtung der Trends kann nicht als einheitlich beschrieben werden. Bei den Stationen Müzzzuschlag und Schwarzau im Gebirge stellte sich im letzten Jahrhundert ein positiver Trend ein, der ein Plus von durchschnittlich 4, 07 mm bzw. 3,26 mm Zuwachs der Jahressummen verzeichnet.

Allgemein kann gesagt werden, dass, obwohl auch signifikant steigende Tendenzen vorhanden sind, im Untersuchungsgebiet zum größten Teil negative Entwicklungen vorherrschen. Elf Stationen zeigen eine Abnahme der Jahresniederschlagssummen an. Auf einem Signifikanzniveau von 5 % weisen jedoch nur die Stationen Neunkirchen und Stixenstein einen signifikanten fallenden Trend auf.

Tabelle 6: Trendanalyse der Frühlingsmonate MAM (Niederschlag)

<i>Frühjahr (MAM)</i>					
<i>Station</i>	<i>z</i>	<i>P</i>	<i>Trend</i>	<i>Zeitreihe</i>	<i>mm/Jahr</i>
01 Brunngraben	2,33	< 0,05	steigend	1945-2004	+1,18
02 Gloggnitz	-1,35	> 0,05	insign.	1951-2004	-0,18
03 Gollrad	-1	> 0,05	insign.	1895-2004	-0,01
04 Hieflau	-1,22	> 0,05	insign.	1896-2002	-0,29
05 Kaiserbrunn	0,82	> 0,05	insign.	1893-2004	+0,60
06 Müzzsteg	1,52	> 0,05	insign.	1893-2004	+0,76
07 Müzzzuschlag	1,63	> 0,05	insign.	1893-2006	+1,13
08 Naßwald	0,16	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,06
09 Neunkirchen	-1,06	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,31
10 Pottschach	-0,49	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,03
11 Reichenau	-0,51	> 0,05	insign.	1893-2004	+0,07
12 Rohr im Gebirge	1,41	> 0,05	insign.	1896-2004	+0,11
13 Schwarzau im Gebirge	0,76	> 0,05	insign.	1893-2004	+0,96
14 Stixenstein	-2,33	< 0,05	fallend	1893-2004	-0,82
15 Weichselboden	-0,73	> 0,05	insign.	1896-2004	-0,08
16 Wildalpen	0	> 0,05	insign.	1896-2004	+0,07
17 Winterhöhe	-0,45	> 0,05	insign.	1947-2007	-0,18

In den Frühjahrsmonaten März, April und Mai sind kaum signifikante Veränderungen bemerkbar. Nur zwei Stationen weisen einen wesentlichen Trend auf. Die Station Stixenstein zeigt eine fallende Tendenz, wohingegen die Station Brunngraben eine Zunahme zu verzeichnen hat. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Messzeitreihe in Brunngraben mit nur 58 Jahren verglichen mit der 107 Jahre langen Messreihe erheblich kürzer ist und womöglich nur einen kurzfristigeren Trend widerspiegelt. Die Zunahmen und Abnahmen der jährlichen Niederschlagssummen an den einzelnen Stationen sind im Frühjahr relativ ausgeglichen. Es kann keine Richtung des Trends festgestellt werden.

Tabelle 7: Trendanalyse der Sommermonate JJA (Niederschlag)

Sommer (JJA)					
Station	z	P	Trend	Zeitreihe	mm/Jahr
<i>Brunngraben</i>	-1,73	> 0,05	insign.	1945-2004	-0,93
<i>Gloggnitz</i>	-1,35	> 0,05	insign.	1951-2004	-1,21
<i>Gollrad</i>	-1,18	> 0,05	insign.	1895-2004	-0,54
<i>Hieflau</i>	-1,04	> 0,05	insign.	1896-2002	-1,04
<i>Kaiserbrunn</i>	0,49	> 0,05	insign.	1893-2004	+0,14
<i>Mürzsteg</i>	0	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,05
<i>Mürzzuschlag</i>	0,2	> 0,05	insign.	1893-2006	+0,97
<i>Naßwald</i>	-0,49	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,39
<i>Neunkirchen</i>	-2,12	< 0,05	fallend	1893-2004	-0,59
<i>Pottschach</i>	0,16	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,27
<i>Reichenau</i>	-0,51	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,20
<i>Rohr im Gebirge</i>	-1,06	> 0,05	insign.	1896-2004	-0,42
<i>Schwarzau im Gebirge</i>	1,67	> 0,05	insign.	1893-2004	+0,64
<i>Stixenstein</i>	-2,54	< 0,05	fallend	1893-2004	-0,98
<i>Weichselboden</i>	-1,46	> 0,05	insign.	1896-2004	-0,64
<i>Wildalpen</i>	-1,89	> 0,05	insign.	1896-2004	-0,59
<i>Winterhöhe</i>	-2,24	< 0,05	fallend	1947-2007	-2,55

Die Untersuchung der Sommermonate ergibt eine eindeutige Tendenz hin zu sinkenden Niederschlagssummen. Die Daten der Stationen Neunkirchen, Stixenstein und Winterhöhe weisen einen signifikant fallenden Trend auf. Von den gesamten Stationen im Untersuchungsgebiet zeigen lediglich drei eine steigende Entwicklung, die allerdings statistisch gesehen nicht signifikant ist. Diese drei Stationen - Kaiserbrunn, Mürzzuschlag und Schwarzau im Gebirge - zeigen auch bei der Analyse der Jahressummen eine Steigerung des Niederschlags an.

Tabelle 8: Trendanalyse der Herbstmonate SON (Niederschlag)

Herbst (SON)					
Station	z	P	Trend	Zeitreihe	mm/Jahr
<i>Brunngraben</i>	0,53	> 0,05	insign.	1945-2004	+1,70
<i>Gloggnitz</i>	0,56	> 0,05	insign.	1951-2004	+0,47
<i>Gollrad</i>	-0,19	> 0,05	insign.	1895-2004	+0,28
<i>Hieflau</i>	-1,63	> 0,05	insign.	1896-2002	-0,44
<i>Kaiserbrunn</i>	-0,16	> 0,05	insign.	1893-2004	+0,10
<i>Mürzsteg</i>	0,67	> 0,05	insign.	1893-2004	+0,30
<i>Mürzzuschlag</i>	1,63	> 0,05	insign.	1893-2006	+0,73
<i>Naßwald</i>	-0,82	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,33
<i>Neunkirchen</i>	-1,06	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,27
<i>Pottschach</i>	-1,48	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,31
<i>Reichenau</i>	-0,85	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,19
<i>Rohr im Gebirge</i>	-0,17	> 0,05	insign.	1896-2004	-0,16
<i>Schwarzau im Gebirge</i>	2,12	< 0,05	steigend	1893-2004	+0,80
<i>Stixenstein</i>	-2,87	< 0,05	fallend	1893-2004	-0,77
<i>Weichselboden</i>	-0,54	> 0,05	insign.	1896-2004	+0,14
<i>Wildalpen</i>	-0,96	> 0,05	insign.	1896-2004	+0,13
<i>Winterhöhe</i>	1,79	> 0,05	insign.	1947-2007	-0,05

Die Herbstmonate sind ähnlich wie die Frühjahrsmonate von indifferenten Entwicklungen gekennzeichnet. Nur die Stationen Schwarzau im Gebirge und Stixenstein weisen einen signifikanten Trend auf. Wobei ersterer steigend und der Trend in Stixenstein wieder fallend ist. Die weiteren Stationen sind zu annähernd gleichen Teilen entweder steigend oder fallend in ihrer Tendenz.

Tabelle 9: Trendanalyse der Wintermonate DJF (Niederschlag)

Winter (DJF)					
Station	z	P	Trend	Zeitreihe	mm/Jahr
<i>Brunngraben</i>	0,15	> 0,05	insign.	1945-2004	+0,22
<i>Gloggnitz</i>	0,56	> 0,05	insign.	1951-2004	-0,15
<i>Gollrad</i>	-1,96	< 0,05	fallend	1895-2004	-0,31
<i>Hieflau</i>	-1,28	> 0,05	insign.	1896-2002	-0,39
<i>Kaiserbrunn</i>	1,87	> 0,05	insign.	1893-2004	+0,53
<i>Mürzsteg</i>	1,87	> 0,05	insign.	1893-2004	+0,77
<i>Mürzzuschlag</i>	2,84	< 0,05	steigend	1893-2006	+1,10
<i>Naßwald</i>	-0,44	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,07
<i>Neunkirchen</i>	-1,22	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,31
<i>Pottschach</i>	-2,33	< 0,05	fallend	1893-2004	-0,54
<i>Reichenau</i>	-0,17	> 0,05	insign.	1893-2004	-0,01
<i>Rohr im Gebirge</i>	0,17	> 0,05	insign.	1896-2004	+0,31
<i>Schwarzau im Gebirge</i>	3,41	< 0,05	steigend	1893-2004	+1,29

Stixenstein	-3,67	< 0,05	fallend	1893-2004	-0,82
Weichselboden	0,19	> 0,05	insign.	1896-2004	-0,09
Wildalpen	1,18	> 0,05	insign.	1896-2004	+0,36
Winterhöhe	0,075	> 0,05	insign.	1947-2007	-0,36

Die Niederschlagssummen haben sich im Winter größtenteils verringert. Nur sieben Stationen zeigen eine Erhöhung der Summen und während in den Stationen Gollrad, Pottschach und Stixenstein eine signifikant negative Veränderung zu beobachten ist, sind nur in Schwarza im Gebirge und in Müzzschlag wesentlich steigende Trends zu beobachten.

3.3.2 TRENDS IM ABFLUSS

Die Beobachtung des Abflussverhaltens ist von besonders großer Bedeutung, da die Entwicklungen einzelner Niederschlagsmessstationen durch sehr kleinräumige Einflüsse gestört werden und somit die Trends nicht so gut wiedergeben können wie Abflussmessungen, die durch das gesamte orographische Einzugsgebiet beeinflusst werden. Leider reichen die brauchbaren Pegelmessungen nicht so weit zurück wie die Niederschlagsmessungen, was in Bezug auf die Langzeitenentwicklungen von Nachteil ist.

Tabelle 10: Trendanalyse der Jahreswerte (Abfluss)

Jahreswerte					
Messstelle	z	P	Trend	Messreihe	m³/s
Gloggnitz	-1,15	> 0,05	insign.	1948-2004	-0,03
Gußwerk	1,28	> 0,05	insign.	1965-2004	+0,01
Neuberg a. d. Mürz	-0,17	> 0,05	insign.	1961-2004	+0,02
Schwarza im Gebirge	-0,75	> 0,05	insign.	1967-2004	+0,01
Singerin (Höllental)	2,36	< 0,05	steigend	1951-2004	+0,02
Singerin (Steg)	0,37	> 0,05	insign.	1967-2004	+0,004
Wildalpen	0,47	> 0,05	insign.	1951-2004	+0,04

Die Analyse der Jahresmittelwerte der Abflüsse ergibt eine eindeutige Richtung des Trends in eine Zunahme. Jedoch ist nur an der Messstelle Singerin (Höllental) ein signifikanter Wert zu erkennen. Nur eine Messstelle, und zwar die in Gloggnitz, weist eine rückläufige Tendenz auf. Das ist auch der Pegel, der das zweitgrößte orographische Einzugsgebiet fasst. Auffällig ist auch, dass dieser die längste Messreihe aufweist.

Tabelle 11: Trendanalyse der Frühjahrsmonate MAM (Abfluss)

Frühjahr (MAM)					
Messstelle	z	P	Trend	Messreihe	m³/s
Gloggnitz	-0,23	> 0,05	insign.	1948-2004	-0,04
Gußwerk	0,73	> 0,05	insign.	1965-2004	-0,01
Neuberg a. d. Mürz	0,87	> 0,05	insign.	1961-2004	+0,004
Schwarzau im Gebirge	-0,19	> 0,05	insign.	1967-2004	+0,004
Singerin (Höllental)	0,94	> 0,05	insign.	1951-2004	+0,01
Singerin (Steg)	0,37	> 0,05	insign.	1967-2004	+0,006
Wildalpen	0,94	> 0,05	insign.	1951-2004	+0,04

Betrachtet man die Frühjahrsmonate, so ist eine Entwicklung erkennbar, die beinahe der Entwicklung der Jahresmittelwerte entspricht. An acht Pegeln ist eine Zunahme zu erkennen, jedoch keine davon ist signifikant. Die Messstellen Gloggnitz und Gußwerk verzeichnen einen negativen Trend. Aufgrund der Tatsache, dass sich hier keine einzige signifikante Veränderung feststellen lässt, sind die Entwicklungen in diesem Gebiet relativ stationär.

Tabelle 12: Trendanalyse der Sommermonate JJA (Abfluss)

Sommer (JJA)					
Messstelle	z	P	Trend	Messreihe	m³/s
Gloggnitz	-2,06	< 0,05	fallend	1948-2004	-0,08
Gußwerk	0,18	> 0,05	insign.	1965-2004	-0,05
Neuberg a. d. Mürz	-1,29	> 0,05	insign.	1961-2004	-0,03
Schwarzau im Gebirge	-1,31	> 0,05	insign.	1967-2004	-0,01
Singerin (Höllental)	-1,41	> 0,05	insign.	1951-2004	-0,02
Singerin (Steg)	-0,75	> 0,05	insign.	1967-2004	-0,02
Wildalpen	-0,47	> 0,05	insign.	1951-2004	-0,1

Im Sommer ist, wie schon bei den Niederschlagsdaten zu beobachten war, ein starker Trend zum Rückgang zu verzeichnen. Nur in Gloggnitz ist dieser Trend jedoch signifikant, was wahrscheinlich aus der langen Beobachtungsdauer resultiert. Die Korrelation der Niederschlags- und der Abflussdaten zeigt also eine eindeutige Tendenz hin zu weniger Niederschlag in den Sommermonaten.

Tabelle 13: Trendanalyse der Herbstmonate SON (Abfluss)

Herbst (SON)					
Messstelle	z	P	Trend	Messreihe	m³/s
<i>Gloggnitz</i>	-1,61	> 0,05	insign.	1948-2004	-0,01
<i>Gußwerk</i>	2,37	< 0,05	steigend	1965-2004	+0,05
<i>Neuberg a. d. Mürz</i>	1,91	> 0,05	insign.	1961-2004	+0,4
<i>Schwarzau im Gebirge</i>	-0,19	> 0,05	insign.	1967-2004	+0,01
<i>Singerin (Höllental)</i>	1,41	< 0,05	insign.	1951-2004	+0,03
<i>Singerin (Steg)</i>	0,37	> 0,05	insign.	1967-2004	+0,01
<i>Wildalpen</i>	1,41	> 0,05	insign.	1951-2004	+0,12

Die Abflusswerte im Herbst zeigen ebenfalls ein sehr homogenes Bild. Die Pegel steigen im Laufe des Beobachtungszeitraums. Eine signifikante Steigerung konnte allerdings nur an der Messstelle Gußwerk ausgewiesen werden. Der Pegel in Gloggnitz ist der einzige, der eine negative Entwicklung aufweist.

Tabelle 14: Trendanalyse der Wintermonate DJF (Abfluss)

Winter (DJF)					
Messstelle	z	P	Trend	Messreihe	m³/s
<i>Gloggnitz</i>	-0,62	> 0,05	insign.	1948-2004	-0,01
<i>Gußwerk</i>	1,39	> 0,05	insign.	1965-2004	+0,02
<i>Neuberg a. d. Mürz</i>	1,5	> 0,05	insign.	1961-2004	+0,02
<i>Schwarzau im Gebirge</i>	1,04	> 0,05	insign.	1967-2004	-0,002
<i>Singerin (Höllental)</i>	2,46	< 0,05	steigend	1951-2004	+0,03
<i>Singerin (Steg)</i>	0,47	> 0,05	insign.	1967-2004	-0,003
<i>Wildalpen</i>	1,51	> 0,05	insign.	1951-2004	+0,04

Im Winter gibt es Abflusswerte, die sich im Laufe der Zeit verringert haben, sowohl als auch solche, die sich erhöhten. Nur ein Pegel, Singerin (Höllental), weist eine signifikante Steigung auf. Aufgrund der Zwischenspeicherung von Niederschlag in Form von Schnee sind die Abflusswerte im Winter generell sehr niedrig.

3.3.3 TRENDS DER TEMPERATUR

Durch die Beobachtung der Temperaturentwicklung können Rückschlüsse auf die Verdunstung und somit den Wasserhaushalt des Gebietes gezogen werden. Vor allem in den letzten Jahrzehnten, in denen man einen ungewöhnlich hohen globalen Temperaturanstieg feststellen konnte, wurde es interessant, auch regionale Temperaturentwicklungen genauer zu betrachten.

Tabelle 15: Trendanalyse der Jahreswerte (Temperatur)

<i>Jahreswerte</i>				
<i>Station</i>	<i>z</i>	<i>Trend</i>	<i>°C/Jahr</i>	<i>Messreihe</i>
<i>Brunngraben</i>	-0,47	Insign.	-0,009	1947-2007
<i>Hieflau</i>	+0,94	Insign.	+0,004	1925-2006
<i>Mürzsteg</i>	-2,74	fallend	-0,005	1911-2005
<i>Mürzzuschlag</i>	+2,33	steigend	+0,021	1948-2007
<i>Reichenau</i>	-1,33	Insign.	-0,002	1896-2006
<i>Schwarzau</i>	-2,41	fallend	-0,004	1896-1998
<i>Semmering</i>	+0,69	Insign.	+0,005	1901-1970
<i>Weichselboden</i>	+2,53	steigend	+0,010	1949-2007
<i>Wildalpen</i>	+0,82	Insign.	+0,002	1956-2005

Die Analyse der Jahreswerte der Temperaturentwicklung ergibt kein, wie vorher angenommen, homogenes Bild. Von neun herangezogenen Stationen zeigen vier einen signifikanten Trend. In Mürzsteg und in Schwarzau wurde ein fallender Trend in den Temperaturwerten festgestellt. Auffallend ist, dass es sich hierbei um zwei der längsten beobachteten Zeitreihen handelt. Auch bei der Station Reichenau ist eine fallende, jedoch nicht signifikante, Tendenz ersichtlich. Auch hier handelt es sich um einen 100 jährigen Beobachtungszeitraum. Die Stationen, die einen steigenden Trend aufweisen, reichen zum größten Teil nur bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts zurück.

Tabelle 16: Trendanalyse der Frühjahrsmonate MAM (Temperatur)

<i>Frühjahr (MAM)</i>				
<i>Station</i>	<i>z</i>	<i>Trend</i>	<i>°C/Jahr</i>	<i>Messreihe</i>
<i>Brunngraben</i>	0	Insign.	-0,009	1947-2007
<i>Hieflau</i>	-0,21	Insign.	+0,001	1925-2006
<i>Mürzsteg</i>	-1,67	Insign.	-0,005	1911-2005
<i>Mürzzuschlag</i>	2,33	steigend	+0,019	1948-2007
<i>Reichenau</i>	-0,77	Insign.	-0,001	1896-2006
<i>Schwarzau</i>	-2,41	fallend	-0,007	1896-1998
<i>Semmering</i>	+0,23	Insign.	+0,007	1901-1970
<i>Weichselboden</i>	+1,061	Insign.	+0,011	1949-2007
<i>Wildalpen</i>	+0,33	Insign.	+0,006	1956-2005

In den Frühjahrsmonaten ist kaum ein Trend festzustellen. Lediglich zwei Stationen weisen eine wesentliche Veränderung auf. In Mürzzuschlag gibt es einen steigenden Trend in den Temperaturwerten, in Schwarzau, wie schon in der Jahresauswertung, einen fallenden. Vier weitere Stationen zeigen eine steigende Tendenz, drei weitere eine fallende.

Tabelle 17: Trendanalyse der Sommermonate JJA (Temperatur)

Sommer (JJA)				
Station	z	Trend	°C/Jahr	Messreihe
<i>Brunngraben</i>	+0,45	Insign.	-0,008	1947-2007
<i>Hieflau</i>	+0,22	Insign.	+0,003	1925-2006
<i>Mürzsteg</i>	-0,65	Insign.	+0,007	1911-2005
<i>Mürzzuschlag</i>	+3,68	steigend	+0,029	1948-2007
<i>Reichenau</i>	-1,10	Insign.	-0,001	1896-2006
<i>Schwarzau</i>	-1,03	Insign.	-0,002	1896-1998
<i>Semmering</i>	+0,23	Insign.	+0,004	1901-1970
<i>Weichselboden</i>	-0,30	Insign.	+0,003	1949-2007
<i>Wildalpen</i>	+2,77	steigend	+0,013	1956-2005

Im Sommer ist ein eindeutiger steigender Trend nachweisbar. Bei zwei von neun Stationen erkennt man steigende Temperaturwerte. Erneut sind bei den Stationen Reichenau und Schwarzau sowie Brunngraben fallende Tendenzen zu erkennen. Die Analyse gibt jedoch ein klares Signal in Bezug auf die Entwicklungen in den Sommermonaten.

Tabelle 18: Trendanalyse der Herbstmonate SON (Temperatur)

Herbst (SON)				
Station	z	Trend	°C/Jahr	Messreihe
<i>Brunngraben</i>	0	Insign.	-0,005	1947-2007
<i>Hieflau</i>	-0,22	Insign.	-0,001	1925-2006
<i>Mürzsteg</i>	+0,29	Insign.	-0,004	1911-2005
<i>Mürzzuschlag</i>	+1,88	Insign.	+0,012	1948-2007
<i>Reichenau</i>	-1,43	Insign.	-0,003	1896-2006
<i>Schwarzau</i>	-0,73	Insign.	-0,002	1896-1998
<i>Semmering</i>	+1,61	Insign.	+0,023	1901-1970
<i>Weichselboden</i>	+2,43	steigend	+0,020	1949-2007
<i>Wildalpen</i>	-0,65	Insign.	-0,002	1956-2005

Die Analyse der Herbstmonate zeigt ein ganz anderes Bild. Hier tendieren die meisten Beobachtungen zu einem fallenden Trend. Nur eine Messreihe zeigt eine signifikante positive Temperaturentwicklung. An zwei weiteren Stationen steigen die Werte ebenfalls leicht an. Im Herbst scheinen die Temperaturwerte in diesem Gebiet leicht zu sinken.

Tabelle 19: Trendanalyse der Wintermonate DJF (Temperatur)

Winter (DJF)				
Station	z	Trend	°C/Jahr	Messreihe
Brunngraben	+0,23	Insign.	-0,014	1947-2007
Hieflau	+1,78	Insign.	+0,013	1925-2006
Mürzsteg	-1,83	Insign.	-0,017	1911-2005
Mürzzuschlag	+1,61	Insign.	+0,020	1948-2007
Reichenau	-1,66	Insign.	-0,005	1896-2006
Schwarzau	-0,98	Insign.	-0,010	1896-1998
Semmering	-0,47	Insign.	-0,008	1901-1970
Weichselboden	+0,23	Insign.	+0,006	1949-2007
Wildalpen	+0,41	Insign.	-0,002	1956-2005

Im Winter waren keine signifikanten Trends auszumachen. Man kann lediglich feststellen, dass sechs der neun Stationen zu sinkenden Temperaturen neigen. Die Stationen Hieflau, Mürzzuschlag und Weichselboden weisen steigende Tendenzen auf.

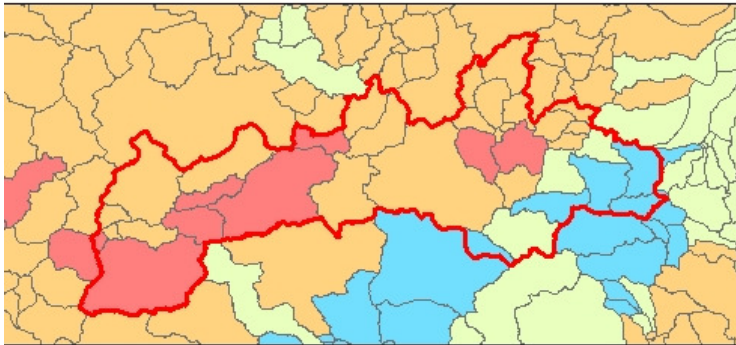
3.3.4 TRENDS DER SAISONALEN WASSERBILANZ

Die Karten zu den Trends der saisonalen Wasserbilanz stammen, wie jene zur Wasserbilanz im Untersuchungsraum aus dem Hydrologischen Atlas Österreichs. Das räumlich verteilte, konzeptionelle Wasserbilanzmodell COSERO wurde für den Zeitraum 1951 – 2000 angewendet. Um die Speicherung von Schnee auszuschließen, wurde Beginn und Ende der Simulationsperiode im Sommer gewählt. Das Wasserbilanzmodell beinhaltet folgende Komponenten:

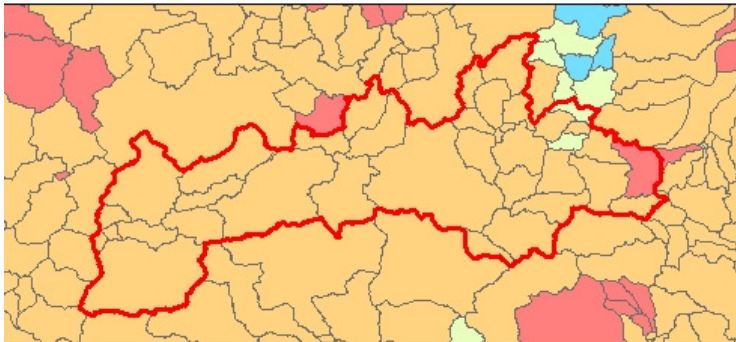
- Niederschlag
- Temperatur
- Abweichung der potentiellen Verdunstung vom langjährigen Mittel
- Abweichung der Tagestemperaturen von der Monatstemperatur
- beobachteter Abfluss

Das Ergebnis sind Zeitreihen der räumlich verteilten Wasserbilanzkomponenten. Dieses Modell unterteilt Österreich in 16 Berechnungsgebiete, die wiederum aus insgesamt 188 Teilgebieten bestehen. Die Teilgebiete basieren auf einem Raster von 1 x 1 km Größe, wobei jede Modellzone einem orographischen Einzugsgebiet zugeordnet werden kann (Fürst et al., 2007).

Für die Trendanalyse der Modellergebnisse wurde der saisonale Mann- Kendall Trend Test herangezogen. Die dargestellten Trends beziehen sich für jeweils eine Jahreszeit auf die Änderung der monatlichen Vorratsänderung in Prozent des mittleren Jahresniederschlages.



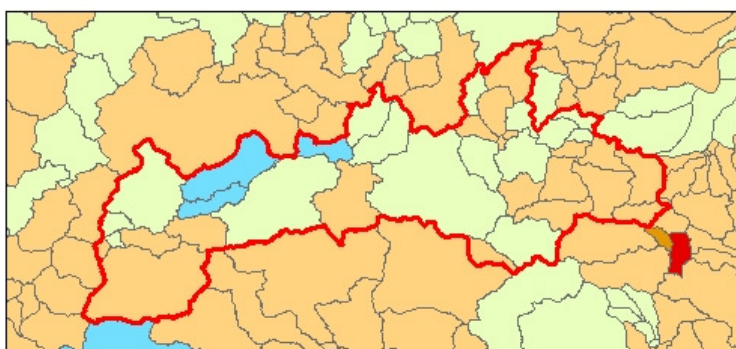
**Trend der
Saisonalen Wasserbilanz
Frühling**



**Trend der
Saisonalen Wasserbilanz
Sommer**



**Trend der
Saisonalen Wasserbilanz
Herbst**

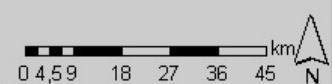


**Trend der
Saisonalen Wasserbilanz
Winter**

**Trends der saisonalen Wasserbilanz
(%/Jahr)**

0,025 - 0,050 / signifikant	0,025 - -0,005 / signifikant
0,025 - 0,050 / nicht signifikant	-0,025 - -0,005 / nicht signifikant
0,005 - 0,025 / signifikant	-0,050 - -0,025 / signifikant
0,005 - 0,025 / nicht signifikant	-0,050 - -0,025 / nicht signifikant
-0,005 - 0,005	keine Werte

Untersuchungsraum



Datum: 6/2008
Quelle: Hydrologischer Atlas
Eigene Digitalisierung

Karte 7: Trends der saisonalen Wasserbilanz

Die Analyse der Trends der Änderung des Wasservorrats im Untersuchungsraum ergab ein auffälliges Bild. Im Frühling und im Sommer wurden negative Entwicklungen beobachtet, die meistens signifikant sind. Ein leichter positiver Trend ist im Frühjahr nur im Osten des Gebietes zu erkennen. Im Sommer herrscht im gesamten Raum ein signifikanter negativer Trend vor. Im Herbst stellt sich die Situation anders dar. Der Trend ist deutlich positiv und fast für den gesamten Untersuchungsraum signifikant. Lediglich im Osten ist der Trend nicht signifikant. Im Winter ergeben sich fast ausschließlich negative Trendentwicklungen, die teilweise signifikant sind, jedoch gibt es auch hier Gebiete mit positivem Trend, der allerdings nicht signifikant ist.

3.4 AUSWERTUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Die Langzeitanalyse des Niederschlags im Untersuchungsraum im Frühjahr korreliert sehr gut mit den Ergebnissen der Trends der Wasserbilanz. Im Osten herrscht ein negativer Trend vor, während im Westen teils signifikante steigende Niederschlagsentwicklungen zu beobachten sind. Betrachtet man die Abflussentwicklung während der Frühjahrsmonate, so liegen keine signifikanten Änderungen vor. Es gibt aber eine Tendenz hin zu steigenden Abflüssen. Die Analyse der Temperaturwerte lässt keine Richtung eines Trends erkennen. Die Messstation in Müzzuschlag verzeichnet signifikante steigende Temperaturverhältnisse, jene in Schwarza im Gebirge signifikante fallende Werte. Insgesamt ist im Frühjahr kein einheitlicher Trend sichtbar, da die Entwicklungen der Parameter kleinräumig stark differenzieren. Die Wasservorratsänderung insgesamt weist jedoch in den höher gelegenen Regionen im Osten eine negative Bilanz auf.

Auch im Sommer stimmen die erarbeiteten Ergebnisse mit der Entwicklung der Wasserbilanz gut überein. Die über hundert Jahre zurückreichenden Langzeitreihen des Niederschlags zeigen den gleichen Trend wie die Trends der Wasservorratsänderungen in den letzten 50 Jahren. Es liegt eine eindeutig negative Tendenz vor. Von den 17 herangezogenen Stationsmessreihen sind allerdings nur drei signifikant negativ. Die Trends der saisonalen Wasserbilanz sind hingegen im gesamten Untersuchungsgebiet signifikant. Das kann daran liegen, dass nur während der letzten 50 Jahre ein eindeutig negativer Trend vorliegt. Betrachtet man die Entwicklungen in einem größeren Zeitfenster, so schwächen sich manche Trends ab. Gerade deshalb ist eine Analyse möglichst langer Zeitreihen von großer Bedeutung. Auch die Abflüsse weisen einen Rückgang der Wassermengen im Sommer auf. Jedoch sind nur die Messwerte der Messstelle Gloggnitz signifikant fallend. Die Temperaturwerte im Sommer zeigen durchwegs einen steigenden Trend an. Zusammenfassend sind im Sommer rückläufige Niederschlagsverhältnisse sowie ein negativer Trend des Abflussverhaltens beobachtet worden. Die Temperatur ist während des Beobachtungszeitraums gestiegen.

Die signifikante Zunahme der Wasservorräte, wie sie im Herbst im hydrologischen Atlas dargestellt wird, ist in den Entwicklungen der Niederschlagsverhältnisse der Langzeitanalyse nicht wieder zu erkennen. Hier gibt es weder häufig signifikante Trends noch weisen sie in eine bestimmte Richtung. Betrachtet man die Abflusswerte, zeigt sich ein anderes Bild. Die Abflüsse korrelieren weitaus besser mit den Ergebnissen der Trends der Wasserbilanz. Sechs der sieben Zeitreihen weisen einen positiven Trend auf, wobei die Trendanalyse der Messwerte jener Station, an der ein negativer Trend verzeichnet wurde, keine Signifikanz aufweist. Allerdings ist auch von den steigenden Trends nur einer statistisch signifikant. Die Temperaturentwicklungen im Herbst weisen keine einheitliche Richtung auf. Die meisten Stationsmesswerte zeigen eine negative Tendenz, doch diese sind nicht signifikant. Bei den eher im Süden des Untersuchungsraums liegenden Stationen war ein Anstieg der Temperaturen zu beobachten. Ein einziger Trend war signifikant steigend und dieser wurde an der Station Weichselboden beobachtet.

Die Niederschlagentwicklungen im Winter weisen eine eher negative Tendenz auf. Nur in Müzzuschlag und in Schwarza im Gebirge waren signifikant steigende Niederschlagstrends zu beobachten. An den anderen Stationen sind hauptsächlich fallende Niederschlagssummen zu verzeichnen, wobei drei davon statistisch signifikant sind. Der Trend der Wasservorratsänderung weist im Untersuchungsraum keine signifikanten Veränderungen auf. Die Abflusswerte zeigen auch keinen eindeutigen Trend auf. An einer Pegelmessstelle wurde ein signifikanter Anstieg der Abflussmenge beobachtet, die anderen Stationen hingegen zeigen weder eine bestimmte Richtung eines Trends noch sind diese statistisch signifikant. Des Weiteren sind keine Trends in der Entwicklung der Temperatur zu erkennen. Insgesamt hat es im Winter im Analysezeitraum kaum große Veränderungen gegeben.

Die Analyse der Jahreswerte des Niederschlags zeigt keine einheitlichen Trendrichtungen auf. Im Osten des Untersuchungsgebietes verminderte sich die Jahresniederschlagssumme in den letzten 111 Jahren. In Müzzuschlag und in Schwarza im Gebirge gab es einen signifikanten Anstieg. Die übrigen Stationen zeigen keine signifikante Trendänderung oder eine einheitliche Richtung der geringen Änderungen. Die Jahreswerte der Abflussmengen zeigen hingegen eine deutliche steigende Tendenz, wobei aber nur die Abflüsse der Messstelle Singerin (Höllental) statistisch signifikant sind. Nur eine Station weist eine negative Tendenz auf. Es handelt sich dabei um die Pegelmessstelle Gloggnitz. Bei der Analyse der Abflüsse ist zu berücksichtigen, dass die Messreihen nicht so lange zurückreichen wie die Niederschlagszeitreihen. Die Entwicklungen der Jahresmitteltemperaturen weisen keine eindeutige Richtung eines Trends auf. Von neun analysierten Stationen weisen fünf einen positiven und vier einen negativen Trend auf. Es sind jeweils zwei statistisch signifikant.

Zusammenfassend können folgende Aussagen getroffen werden:

- Im Beobachtungszeitraum ergaben sich abnehmende Niederschlagsjahressummen im Osten des Untersuchungsraums und zunehmende im Westen. Dasselbe Bild zeigt sich bei der Betrachtung der Entwicklungen im Frühjahr.
- Im Sommer zeigen sich eindeutige Trends: Die Temperatur ist gestiegen, die Niederschlags- sowie die Abflussmengen sind zurückgegangen.
- Die saisonale Wasserbilanz zeigt eine deutliche Erhöhung der Wasserspeicherung im Herbst. Die Abflusswerte im Herbst haben sich auch erhöht. Allerdings konnte bei der Betrachtung der Niederschlagsentwicklung keine eindeutige Trendrichtung festgestellt werden. Der Beobachtungszeitraum der Niederschläge ist jedoch deutlich länger als der der Abflüsse und der Wasserbilanz.
- Im Winter konnten kaum positive oder negative Entwicklungen festgehalten werden. Insgesamt gibt es keine nennenswerten Veränderungen in eine bestimmte Richtung im Winter.
- Bei der Analyse der kürzeren Zeitreihen wie den Abflüssen und der saisonalen Wasserbilanz ergaben sich häufiger Trends als bei den Niederschlagssummen. Das zeitliche Fenster der Betrachtungen muss sehr genau berücksichtigt werden!

4 KLIMAMODELLIERUNG

In diesem Kapitel werden die Entwicklung der Klimamodellierung und deren Möglichkeiten zum heutigen Zeitpunkt zusammengefasst. Im derzeitigen Brennpunkt der Wissenschaft steht die Entwicklung von möglichst hochauflösenden Klimamodellen, um regionale Auswirkungen des Klimawandels abschätzen zu können. Ein wichtiger Punkt in diesem Zusammenhang ist die Quantifizierung von Unsicherheiten bei der Modellierung eines so komplexen Systems. Denn trotz rasend erfolgreichen voranschreitenden Fortschritten in diesem Bereich bleibt eine Ungewissheit in Bezug auf die Richtigkeit von Langzeitsimulationen.

4.1 GESCHICHTE DER KLIMAMODELLIERUNG

Je nach beabsichtigter Anwendung oder erwünschter Wiedergabe von Details in einem Modell gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, auf die man zurückgreifen kann. Manche Modelle vernachlässigen absichtlich bestimmte Prozesse im Klimasystem oder verzichten auf hohe Auflösungen, während andere größtmögliche Details anstreben. Allgemeine Zirkulationsmodelle, die heute die Zugpferde der Klimamodellierung darstellen, entwickelten sich bereits in den 60er Jahren auf der wissenschaftlichen und technischen Grundlage der numerischen Wettervorhersage (Gates, 2003). Diese Zirkulationsmodelle basieren auf „primitiven“ (ursprünglichen) Gleichungen. Sie werden deshalb so genannt, weil sie aus physikalischen Grundprinzipien hergeleitet und (beinahe) frei von Annahmen sind (Roeckner, 2003).

Im Jahre 1956 präsentierte PHILLIPS (Phillips, 1956) sein heute klassisches numerisches Experiment, das als erstes atmosphärisches Zirkulationsmodell (general circulation model - GCM) bezeichnet werden konnte. Einen bahnbrechenden Fortschritt erreichten MANABE und WETHERALD (Manabe, Wetherald, 1967), indem sie 1967 die Auswirkungen einer Verdopplung von Kohlendioxid in der Atmosphäre simulierten und somit zum ersten Mal die heute weithin anerkannten Muster der globalen Erwärmung aufzeigten. Etwa zur selben Zeit begann man damit, Ozeanmodelle zu entwickeln, die ihre Wurzeln in der geophysikalischen Flüssigkeitsdynamik haben. 1969 entwickelte BRYAN das erste Modell, das wir heute als Zirkulationsmodell des Ozeans anerkennen. Als logische Konsequenz unternahm man Anstrengungen, die Klimasimulationen dieser beiden Modelle miteinander zu koppeln. Bahnbrechende Studien von MANABE, BRYAN und SPELMAN (Manabe

et al., 1991)stellten eine solide Basis für die intensive Entwicklung von Atmosphären-Ozeanmodellen dar, die in den achtziger und neunziger Jahren stattfand (Gates, 2003). Als limitierender Faktor galt stets die Leistung der Computer, die für die Simulationen benötigt wurden, wodurch die Entwicklung der Rechnerleistung von der Klimaforschung maßgeblich vorangetrieben wurde. Seit den 1970ern bis heute wurde diese Leistung um den Faktor eine Million gesteigert. Dieser technologische Fortschritt ermöglichte es, immer mehr Komponenten und Prozesse einzubinden und die Länge der Simulationen so wie deren Auflösung fortwährend zu verbessern. Die Abbildung 7 zeigt die Entwicklung der Generationen der IPCC-Modelle vom *First Assessment Report (FAR)*, 1990 über den *Second (SAR)*, 1996, und *Third Assessment Report (TAR)*, 2001, bis zum Jüngsten, den *Assessment Report 4 (AR4)*, der 2007 erschienen ist. Langzeitsimulationen, die ein Jahrhundert betrachten, werden seit dem ersten Assessment Report mit dem jeweiligen Vorgängermodell gerechnet. Die vertikale Auflösung, die hier nicht dargestellt wird, hat sich im Laufe der Zeit vergleichbar schnell entwickelt. Anfangs wurde der Ozean durch nur eine vertikale Schicht dargestellt, die Atmosphäre mit zehn. Heutzutage werden im Ozean sowie in der Atmosphäre je 30 Schichten für die Modellierung unterschieden. Aber nicht nur die verbesserte Auflösung führte zu einem erheblichen Fortschritt in der Klimasimulation. Durch das Einbinden immer mehr Komponenten des Klimasystems in die Modellierung wurden die Ergebnisse immer aussagekräftiger (Le Treut et al., 2007). Zurzeit fließen folgende Komponenten in die Simulationen ein:

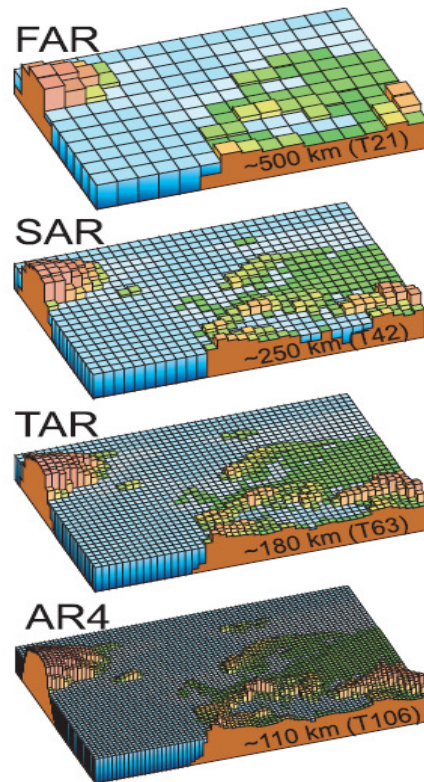


Abbildung 7: Horizontale Auflösung der Modellgenerationen des IPCC (Quelle: Le Treut et al., 2007)

- | | |
|-------------------|------------------------|
| ▪ Atmosphäre | ▪ Aerosole |
| ▪ Ozean | ▪ Kohlenstoffkreislauf |
| ▪ Topographie | ▪ Vegetationsdynamik |
| ▪ Sulfat Aerosole | ▪ Atmosphärenchemie |

4.2. GLOBALE ZIRKULATIONSMODELLE

Globale Zirkulationsmodelle wurden entwickelt um, das globale Klimasystem zu simulieren. Mit einer dreidimensionalen räumlichen Auflösung von Atmosphäre und Ozean können viele Prozesse sowie die Strömungs- und die Thermodynamik, basierend auf physikalischen Grundprinzipien, einigermaßen realistisch und detailliert dargestellt werden. Durch die Vielzahl der im Klimasystem interagierenden Prozesse und deren räumlich variierende Gegebenheiten wie Albedo, Topographie oder Wolken etc. ist es notwendig, sich mit numerischen Näherungsgleichungen zu behelfen.

Um diese Näherungslösungen zu erhalten, sind eine räumliche und eine zeitliche Diskretisierung nötig. Zur räumlichen Diskretisierung wird die Erdoberfläche durch ein Gitternetz in Segmente unterteilt. Man nennt diesen Vorgang horizontale Diskretisierung. In der Höhe wird die Atmosphäre in Schichten aufgeteilt und somit vertikal diskretisiert. Dasselbe passiert in der Tiefe des Ozeans. Die Schichtdicke wird dabei nicht einheitlich unterteilt, sondern dort feiner aufgelöst, wo die größten vertikalen Unterschiede zu erwarten sind. In der Atmosphäre ist dies die unterste Grenzschicht, im Ozean die obere Deckschicht. Auch die zeitliche Entwicklung wird nicht kontinuierlich, sondern diskret betrachtet. Es wird die mittlere Änderung zwischen zwei Zeitpunkten berechnet. Die zeitliche Auflösung kann im Bereich von Minuten bis hin zu Wochen, je nach gewünschten Details und verfügbarer Rechenleistung, gewählt werden (von Storch et al., 1999).

Viele grundlegende atmosphärische Ereignisse, die sich in ihrer Größenordnung unterhalb der Auflösungsgrenze eines GCM abspielen, werden nicht direkt simuliert. Diese subskaligen Prozesse müssen in den Modellen „parametrisiert“ werden. So wird z.B. die Bildung von Wolken nicht durch Wolkenkondensationskerne, Konvektionssäulen und andere direkte Ursachen dargestellt, sondern über die Parameter Temperatur und Feuchtigkeit für jede Gitterzelle grob berechnet. Die Wolkenbildung spielt im Klimasystem eine bedeutende Rolle und beeinflusst dieses in vielerlei Weise. Diese Prozesse können allerdings heute noch nicht ausreichend gut in Modellberechnungen eingebunden werden (Edwards, 2002). Bei der Parametrisierung wird der Netto-Effekt von nichtaufgelösten Prozessen auf die durch die Diskretisierung aufgelösten Prozesse dargestellt. Nur in wenigen Fällen kann auf eindeutige physikalische Grundprinzipien zurückgegriffen werden. Viel häufiger wird auf der Grundlage von physikalischem Prozessverständnis ein funktionaler Zusammenhang angesetzt. Dieser Ansatz wird dann anhand von Messergebnissen mit einigen freien Konstanten angepasst. Solche Parametrisierungen, die zum Teil auf physikalischen Prinzipien und zum Teil auf empirischer Erkenntnis beruhen, nennt man semi-empirisch (von Storch et al., 1999).

Einige Beispiele für häufig parametrisierte Prozesse (von Storch et al., 1999):

- Ausbreitung kurzwelliger Strahlung
- Ausbreitung langwelliger Strahlung
- Strahlungs-Absorptions-Charakteristiken für Wasserdampf, CO₂ und Ozon
- Bedeckungsgrad und Wassergehalt für konvektive Wolken
- Regentropfenbildung
- Turbulente Durchmischung abhängig von Temperaturschichtung, Wind, Höhe, Rauigkeit
- Wärmespeicherung im Boden
- Einfluss des Vegetationstyps auf Verdunstung und Wasser/Schneespeicherung
- Horizontale subskalige Mischungsvorgänge
- Fluss von Wasserdampf zwischen Untergrund und Atmosphäre

Die Parametrisierung ist nicht unumstritten und birgt viele Probleme. Bei früheren Modellen kam es durch Wolken-Parametrisierungssysteme zum „Wolkenblinken“. So wird eine Schwingung zwischen Vorhandensein und dem Verschwinden einer Wolkendecke zwischen zwei Zeitschritten in einer Gitterzelle bezeichnet. Wolken verhalten sich natürlich nicht so.

Das sogenannte „Tuning“ ist eine weitere wichtige Arbeit der Modellierer. Dieser Term bezeichnet die Feinabstimmung der Parameter, bei der die Werte von Koeffizienten angepasst werden. Manchmal werden auch ganze Gleichungen umgestellt, um insgesamt ein besseres Modellergebnis zu erzielen. Ein besseres Ergebnis kann jenes sein, das mit den Beobachtungen besser korreliert oder nach der Ansicht des Modellierers „physikalisch plausibler“ erscheint. Es gibt Prozesse, bei denen die Parameter relativ gut mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen, aber auch solche, deren Verbindung so ungewiss ist, dass ein Tuning erforderlich ist. Durch die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern wird das Tunen zu einem komplexen Prozess. Verändert man den Koeffizienten eines Parameters, kann sich das auf andere Parameter so auswirken, dass diese aus ihrem akzeptablen Wertebereich herausfallen.

Parametrisierung und das Tuning sind letztendlich wissenschaftliche Kunstformen. Die Beziehungen dieser Prozesse zur physikalischen Theorie und zu den Beobachtungsdaten variieren zum Teil stark (Edwards, 2002).

Für die Durchführung von idealen Modellexperimenten müssen die derzeitigen Modelle um Teilmodelle für die Chemie der Atmosphäre, der Biosphäre, der Spurenstoffkreisläufe sowie der Stratosphäre erweitert werden, sodass man zu einem „Erdsystemmodell“ kommt. Im Idealfall sollte das gesamte Erdsystem im Klimamodell abgebildet werden. In der folgenden Abbildung ist das physikalische Klimasystem blau dargestellt. Dessen Untersuchungen werden vom World Climate Research Project (WCRP) koordiniert. Das biologisch-chemische Klimasystem (gelb) wird durch das International Geosphere-Biosphere Program (IGBP) koordiniert und der anthropogene Anteil am Klimasystem (braun) durch das International Humandimensions Program (IHDP) (Cubasch, 2002).

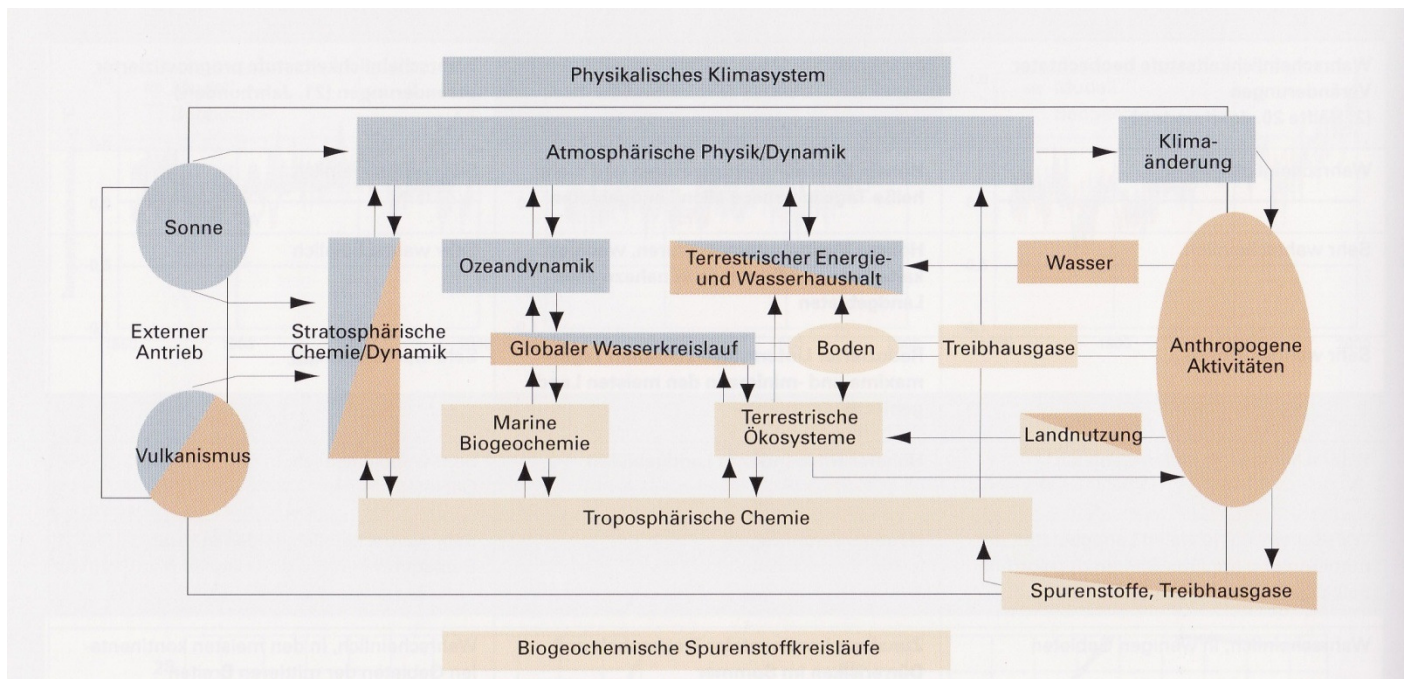


Abbildung 8: Schematische Darstellung eines Erdsystemmodells (Quelle: Cubasch, 2002)

Um aussagekräftige Ergebnisse von Modellexperimenten zu erhalten, müsste man die Rechnungen mit komplexen Erdsystemmodellen vielfach wiederholen und variieren können, was eine massive Rechnerkapazität fordert (Cubasch, 2002).

4.2 SRES SZENARIEN

Um möglichst genaue Simulationen für zukünftige Entwicklungen des Klimas produzieren zu können, braucht man eine Vorstellung von der Zukunft in den Bereichen der Ökonomie, des Bevölkerungswachstums, der sozialen und technologischen Veränderungen sowie über den Verbrauch der Ressourcen oder des Umweltmanagements, welche erheblichen Einfluss auf die Emissionen haben. In der Klimaforschung geht man von einer breiten Palette von möglichen Entwicklungen der Menschheit aus, die eine Reihe von Emissionsszenarien zulassen. Den IPCC-Berichten aus den Jahren 2001 und 2007 lagen die SRES (Special Report on Emission Scenarios) Szenarien zugrunde. Sie wurden auf Basis der IS92 Szenarien entwickelt, welche als Grundlage für den ersten und zweiten IPCC-Bericht entworfen, später aber überarbeitet wurden (Nakicenovic et al., 2001).

Insgesamt gibt es 40 verschiedene Emissionszenarien, die in vier Familien unterteilt werden können (Abb. 9).

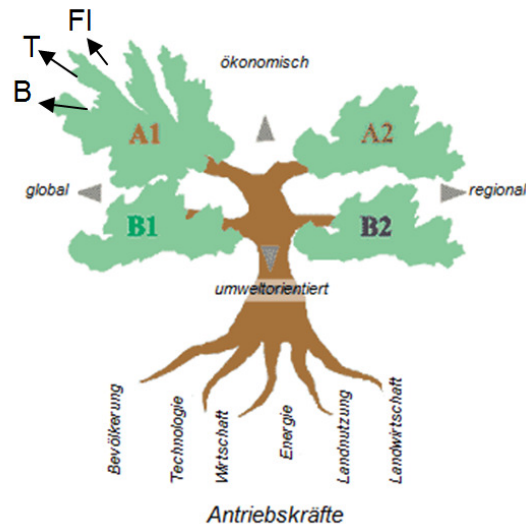


Abbildung 9: Vier Familien der SRES-Szenarien (Quelle: Nakicenovic et al., 2001; bearbeitet)

A1: Die Szenarienfamilie A1 beschreibt eine zukünftige Welt mit raschem Wirtschaftswachstum, einer ab Mitte des 21. Jahrhunderts rückläufigen Weltbevölkerung und mit einer baldigen Einführung neuerer, effizienterer Technologien. Die regionalen Unterschiede des Pro-Kopf-Einkommens verringern sich zusehends. Die A1-Familie teilt sich in drei Bereiche auf, die unterschiedliche Ausrichtungen technologischer Änderungen im Energiesystem beschreiben. Eine dieser Gruppen wird als A1FI bezeichnet, die von einer weiterhin intensiven Nutzung fossiler Brennstoffe ausgeht. A1T beschreibt eine Zukunft, in der nichtfossile Energiequellen herangezogen werden. Die dritte Gruppe bildet eine Zwischengruppe zwischen A1FI und A1T. Sie wird als A1B bezeichnet, was vom englischen Wort *balance* abgeleitet wird.

A2: Die A2-Familie beschreibt eine sehr heterogene Welt. Die Entwicklungen des technologischen Fortschritts und der Wirtschaft verlaufen regional stark unterschiedlich und langsamer als bei anderen Modellgeschichten. Die Bewahrung der lokalen Identität steht im Vordergrund.

B1: Ähnlich wie die A1-Familie geht die B1 Modellgeschichte von einer konvergenten Welt mit einer ab Mitte des 21. Jahrhunderts rückläufigen Bevölkerungsentwicklung aus. Szenario B1 unterscheidet sich allerdings von Szenario A1 durch eine rasche Änderung der wirtschaftlichen Strukturen hin zu einer Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft. Der Materialverbrauch würde zurückgehen und ressourcen-effizientere Technologien würden entwickelt werden. Die Hauptmerkmale sind eine nachhaltige Entwicklung von sozialen, wirtschaftlichen und umweltorientierten Lösungen.

B2: Die B2-Modellgeschichte beschreibt eine regional stark differenzierte Situation. Lösungen für wirtschaftliche, soziale und umweltorientierte Nachhaltigkeit finden sich nur auf lokaler oder regionaler Ebene. Es wird angenommen, dass die Bevölkerung stetig, jedoch langsamer wächst als in Szenario A2 (Nakicenovic et al., 2001).

Im Assessment Report 4 wurden die Szenarien A2, A1B und B1 herangezogen um zukünftige Entwicklungen bis 2100 zu modellieren.

4.3 GLOBALE KLIMAÄNDERUNGEN (NACH IPCC)

Die Ergebnisse der globalen Klimaänderungsprojektionen für das 21. Jahrhundert des vierten Sachstandberichts des IPCC (2007) basieren auf einem System von Klimamodellen, das von gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modellen (AOGCMs) über Erdsystemmodelle von mittlerer Komplexität (EMICs) zu einfachen Klimamodellen (SCMs) reicht. Die Szenarien werden aufgrund der Anzahl der derzeit vorhandenen Klimamodelle als Multi-Modell-Mittelwerte dargestellt. Die andauernden bzw. steigenden Emissionswerte werden sehr wahrscheinlich eine weitere Erwärmung der Erde hervorrufen, die viele Veränderungen des globalen Klimasystems mit sich bringen wird. Die erwarteten Veränderungen für das 21. Jahrhundert werden die beobachteten Änderungen des Klimas während der letzten Jahrzehnte höchstwahrscheinlich übertreffen (Meehl et al., 2007).

4.3.1 GLOBALE TEMPERATURVERÄNDERUNGEN

Nach dem Assessment Report 4 erhärtete sich die Annahme einer zukünftigen Temperaturerhöhung erneut. Alle Modelle, für die Szenarien ohne Anpassung an die Klimaänderungen herangezogen wurden, verzeichnen einen Anstieg der globalen mittleren Lufttemperatur während der kommenden 100 Jahre. Die Erwärmung wird hauptsächlich durch die vermehrten Emissionen von anthropogenen Treibhausgasen angetrieben.

Die projizierte Erwärmung für das frühe und späte 21. Jahrhundert zeigt typische geographische Muster, die szenarienunabhängig und den in den letzten Jahrzehnten beobachteten Entwicklungen sehr ähnlich sind. Der rechte Teil der unteren Abbildung 10 zeigt die Temperaturveränderungen in den Jahren 2020-2029 und 2090-2099 je im Vergleich zum Zeitraum 1980-1999. Die Temperatur steigt über dem Land deutlich stärker an als über dem Ozean. Vor allem in den nördlichen Breiten wird eine starke Erhöhung der Temperaturwerte erwartet. Der linke Teil der Abbildung zeigt, dass je nach Emissionsszenario bis zum Jahr um 2025 eine hohe Wahrscheinlichkeit eines globalen Temperaturanstiegs um ca. +0,5°C besteht. Die projizierte Temperaturerhöhung bis ca. 2095 liegt zwischen +2°C und +3,5°C (Meehl et al., 2007).

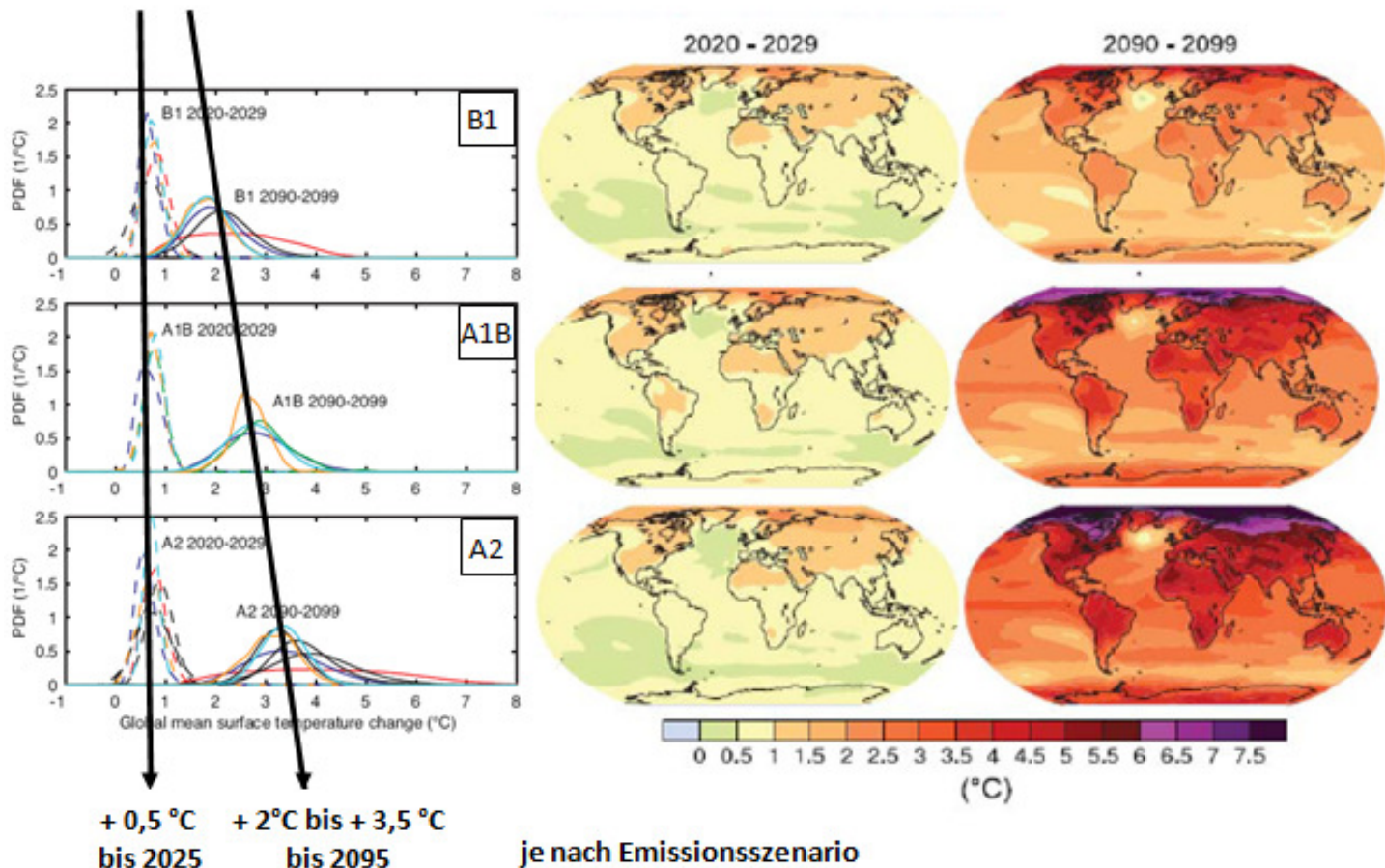


Abbildung 10: Globale Temperaturveränderungen (Quelle: Meehl et al., 2007, bearbeitet)

Im Bezug auf Temperaturextreme ist es sehr wahrscheinlich, dass Hitzewellen intensiver werden, häufiger auftreten und länger andauern. Kaltwetterphasen werden sich in einem wärmeren Klima signifikant verringern und fast überall werden die Tagesminimumtemperaturen schneller ansteigen als die Tagesmaximumtemperaturen. Es wird erwartet, dass sich in den höheren nördlichen Breiten die Anzahl der Frosttage verringert und sich die Vegetationsperiode verlängert.

4.3.2 GLOBALE VERÄNDERUNGEN DER KOMPONENTEN DES WASSERKREISLAUFS

Die Modellsimulationen weisen auf einen Anstieg der Niederschlagssummen mit der globalen Erwärmung hin. Die Unsicherheiten im Bezug auf die Niederschlagsveränderungen sind größer als die für die Temperaturveränderungen. Die Änderungen der Niederschlagsverhältnisse

stellen sich räumlich sowie saisonal stark differenziert dar, jedoch ist eine Zunahme des Niederschlags in den höheren Breiten im Sommer wie im Winter von vielen Modellen dargestellt worden.

Die folgende Abbildung 11 zeigt die globalen Veränderungen des Niederschlags, der Bodenfeuchte sowie des Abflusses und der Verdunstung in mm/Tag in der Darstellung der mittleren Ergebnisse eines Mult-Modell-Ansatzes. Die gepunkteten Zonen signalisieren ein Ergebnis, das von mindestens 80 % der Modelle errechnet wurde. Die Darstellung zeigt den Zeitraum 2080-2099 in Bezug auf die Periode 1980-1999 mit dem zugrundeliegenden A1B Szenario.

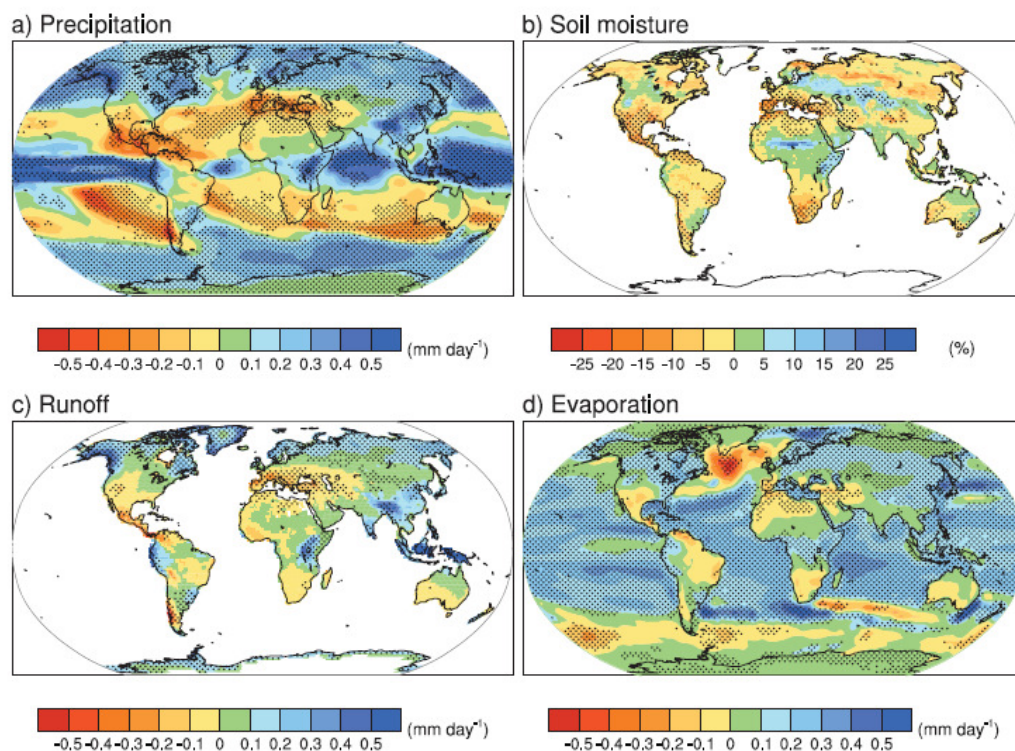


Abbildung 11: Globale Veränderungen des Niederschlags, der Bodenfeuchte, des Abflusses und der Verdunstung in mm/Tag (Quelle: Meehl et al., 2007)

Die höchsten Anstiege der Niederschlagssummen werden in den höheren Breiten als auch in Ostafrika, Zentralasien und dem äquatorialen Pazifik erwartet. In der Mittelmeerregion, der Karibik und den subtropischen Westküsten der Kontinente sind die größten Rückgänge zu verzeichnen. Insgesamt nimmt der Niederschlag über Land mehr zu als über Ozean, wobei natürlich lokale Abweichungen möglich sind. Die globalen Veränderungen der Verdunstung korrelieren insgesamt betrachtet recht gut mit denen des Niederschlags, jedoch aufgrund der Änderungen des atmosphärischen Transports des Wasserdampfes nicht auf lokaler Ebene.

Der Abfluss verringert sich im Süden Europas und in Südostasien beträchtlich. Die größten Veränderungen übertreffen die Werte der Periode 1980-1999 mit über 20 % Steigerung und mehr. Der durch schmelzendes Eis verursachte Abfluss wird hier nicht berücksichtigt.

Die Darstellung der Bodenfeuchte ist relativ schwer, da die Modelle die Feuchte in den oberen Metern der Landoberfläche auf verschiedene Arten simulieren. Im Jahresdurchschnitt verringert sich die Bodenfeuchte in subtropischen sowie in mediterranen Regionen. Eine Steigerung ist in Bereichen mit erhöhtem Niederschlag wie in Ostafrika und Zentralasien zu beobachten. Während die Unsicherheiten in der Magnitude der Veränderungen relativ groß sind, sind die Trends an sich eher zuverlässig (Meehl et al., 2007).

4.3.3 GLOBALE VERÄNDERUNGEN VON WETTER- UND KLIMAEXTREMEN

Durch die Änderung des globalen Klimas, ändern sich auch die Art, die Häufigkeit und die Intensität von Extremereignissen. Diese Veränderungen können schon durch relativ kleine Änderungen des globalen mittleren Klimas hervorgerufen werden. Es wurden bereits Veränderungen dieser Art festgestellt, wie z. B. ein Anstieg der Häufigkeit und der Intensität von Dürreperioden, wie es sie in Europa 2003 gab, und Starkregenereignissen beobachtet. Aber auch Kälteperioden, die durch extreme Kälte gekennzeichnet sind und einige Tage andauern, können häufiger vorkommen.

In einem wärmeren Klima in den meisten Regionen der mittleren und höheren nördlichen Breiten simulieren fast alle Modelle eine höhere Sommertrockenheit und höhere Niederschlagssummen im Winter. Im Sommer führt die Trockenheit zu einem größeren Risiko von Dürren und damit verbunden eine größere Wahrscheinlichkeit von Starkniederschlag- und Hochwassersereignissen, da eine wärmere Atmosphäre eine größere Wasserspeicherkapazität hat. Diese Entwicklungen wurden bereits beobachtet und vieles deutet darauf hin, dass auch in Zukunft durch die Erwärmung intensivere Regenereignisse stattfinden werden und es dazwischen längere Perioden mit nur wenig Niederschlag geben wird.

Eine weitere wichtige Erkenntnis in Bezug auf diese Veränderungen ist, dass es in niederschlagsreicheren Regionen eher zu Starkniederschlagsereignissen kommt und dass extreme Dürren eher in Regionen vorkommen, in denen eine Abnahme des Niederschlags anzunehmen ist. Über Nordeuropa ist eine Zunahme der Niederschläge im Winter sehr wahrscheinlich, was eine höhere Wahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen aufgrund der dadurch erhöhten Abflüsse impliziert.

Die folgende Abbildung 12 zeigt die Veränderungen der Extreme basierend auf einem Multi-Modell-Ansatz von neun gekoppelten Klimamodellen. Die Graphik links oben stellt die global gemittelten Änderungen der Niederschlagsintensität dar. Diese ist definiert als die Jahresniederschlagssumme dividiert durch die Anzahl der Regentage. Rechts daneben ist die räumliche Verteilung der Niederschlagsintensität zwischen zwei 20-jährigen Mitteln (2080-2099 minus 1980-1999) für das A1B Szenario dargestellt. Links unten sind die global gemittelten Änderungen der Trockentage, definiert als das jährliche Maximum

der Anzahl von aufeinanderfolgenden trockenen Tage, dargestellt. Rechts unten ist die räumliche Verteilung wiederum zwischen den 20-jährigen Mitteln (2080-2099 minus 1980-1999, für das A1B Szenario) graphisch aufbereitet (Meehl et al., 2007).

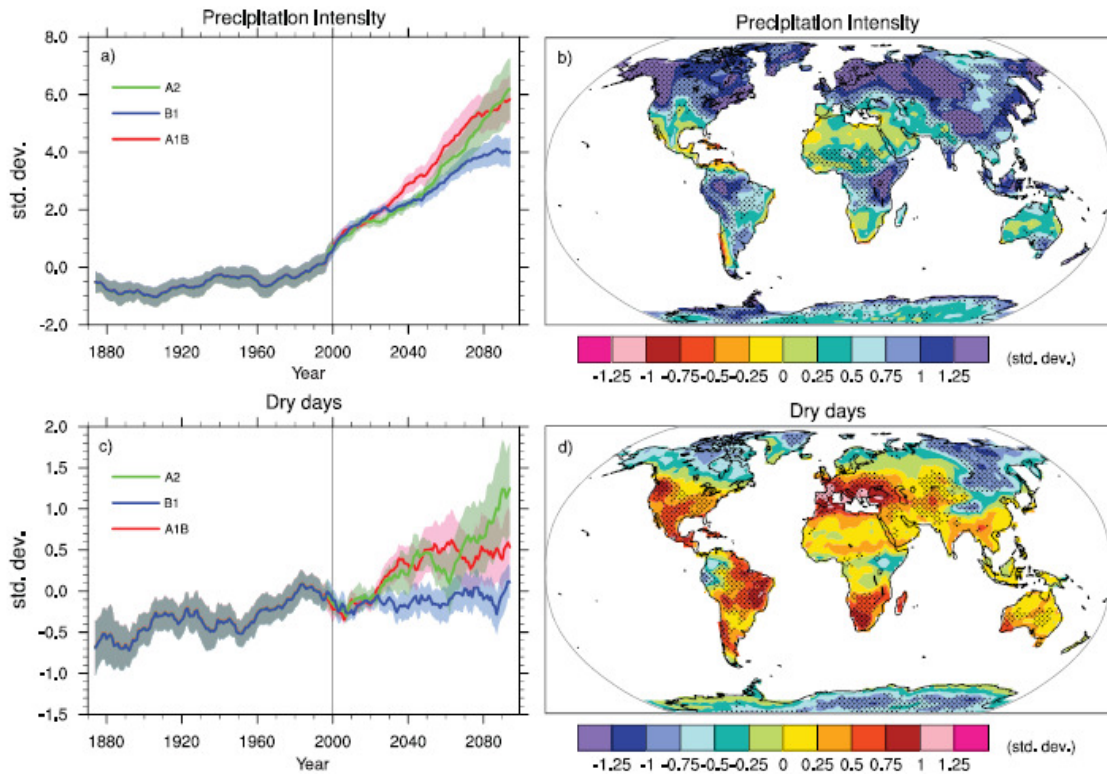


Abbildung 12: Darstellung der Niederschlagsintensität und der Dürreperioden (Quelle: Meehl et al., 2007)

Durch die geringe Auflösung globaler Klimamodelle ist es schwierig, detaillierte Aussagen zu kleineren Regionen zu treffen. Daher wurde für lokale Fragestellungen ein eigenes Instrumentarium entworfen: Regionale Klimamodelle.

4.4 REGIONALE KLIMAMODELLE (RCM)

Bereits Mitte der 80er Jahre wurde die Idee zur Erstellung regionaler Klimamodelle, in Anlehnung an die regionalen Modelle der Wettervorhersage, geboren. Die horizontale Auflösung liegt zwischen 10 und 50 km in einem typischen Rechengebiet mit einer horizontalen Skala von 1000 bis 5000 km Seitenlänge (Schär et al., 2000). Diese regionalen Klimamodelle arbeiten mit einer feineren Struktur als die globalen Zirkulationsmodelle, werden aber letztlich an den Rändern von GCMs angetrieben. Bei einem solchen Verbund zweier Modelle mit unterschiedlicher Auflösung spricht man von „Nesting“. Zur Regionalisierung von Klimamodellen gibt es auch noch andere Ansätze, wie z. B. dynamisches oder statistisches (auch gemischtes) „Downscaling“. Dabei werden

relativ großskalige Modellergebnisse in subskalige, also kleinräumige Befunde, umgesetzt (Schönwiese, 2003).

Werden die regionalen Klimamodelle „genested“, so gehen Daten des GCM in die Berechnungen des regionalen Klimamodells ein. Folgende Abbildung 13 veranschaulicht die Unterschiede, die entstehen können, wenn dasselbe regionale Modell von zwei verschiedenen globalen Zirkulationsmodellen angetrieben wird. Dargestellt sind die simulierten Veränderungen des Luftdrucks, des Niederschlags und des Winds von dem regionalen Klimamodell RCO (Rossby Centre regional Atmosphere-Ocean model) für die Jahre 2071-2100 im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 unter Annahme des A2 Szenarios. Die oberen Abbildungen zeigen das RCO, wenn es von dem globalen Zirkulationsmodell ECHAM4 angetrieben wird, die unteren bei einer „Nestung“ in das HadAM3H.

Während der Antrieb durch das ECHAM4 Modell einen Anstieg des Luftdrucks über dem Alpenbogen, keine Veränderungen in Zentraleuropa und einen starken Abfall des Luftdrucks im Norden simuliert, werden vom HadAM3H nahezu in ganz Europa die Luftdruckverhältnisse um -1 hPa errechnet. Große Unterschiede sind auch bei der Simulation des Niederschlags zu erkennen. Im Norden zeigt das RCM mit den Eingangsdaten des ECHAM4 Steigungen des Niederschlags um bis zu 60 %. Das in das HadAM3H genestete RCO hingegen einen Anstieg von lediglich 20% in derselben Region. Im Süden stimmen die beiden Simulationen mit einer Abnahme von ca. 20 % nahezu überein. Auch bei der Errechnung der Windentwicklungen zeigt das RCO weitaus stärkere Veränderungen wenn es die Antriebsdaten des ECHAM4 erhält.

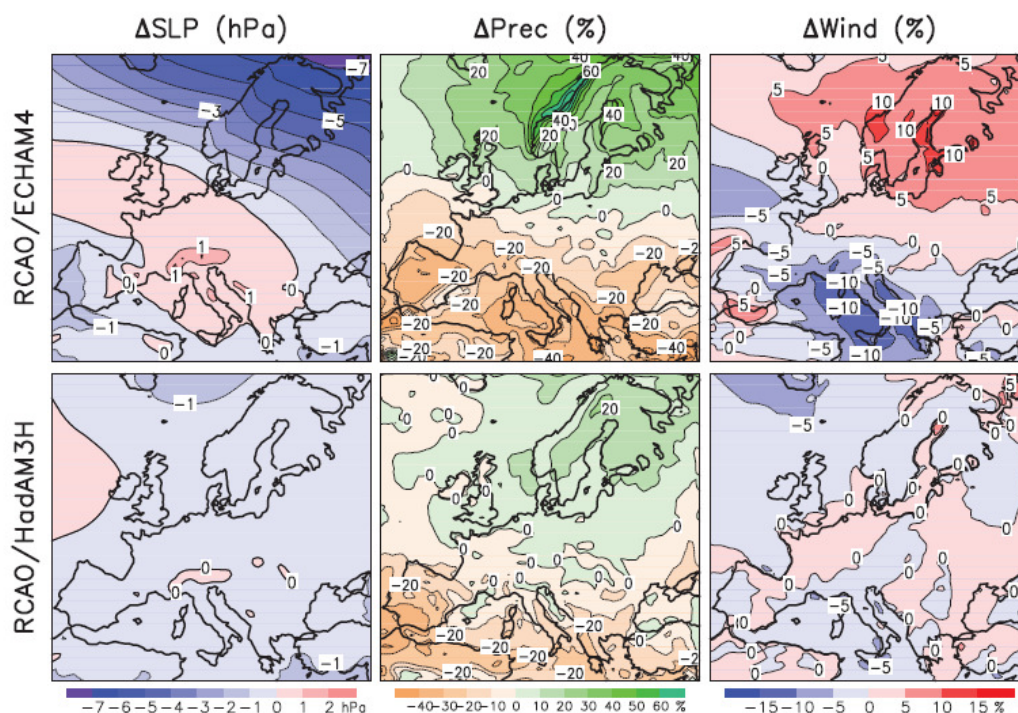


Abbildung 13: Simulierte Veränderungen des Luftdrucks, des Niederschlags und des Winds des RCM RCO mit unterschiedlichen Antriebsmodellen (Quelle: Christensen et al., 2007)

4.5 KLIMAÄNDERUNGEN IN EUROPA (NACH IPCC)

Betrachtet man die globalen Klimaänderungen so sind die direkten thermodynamischen Auswirkungen wie der erhöhte Wasserdampftransport von den niedrigen zu den höheren Breiten, offensichtlich. Auf Europaebene spielen jedoch viele andere Faktoren mit. Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation wirken sich sowohl auf saisonale Entwicklungen als auch auf das Langzeitklima aus. Natürlich spielen auch regionale thermodynamische Faktoren eine bedeutende Rolle, wie z. B. eine Verkürzung der Schneebedeckungsdauer einen positiven Rückkopplungseffekt hervorrufen kann und somit eine Erwärmung noch stärker vorantreibt.

Obwohl viele simulierte Parameter der Klimaänderungen in Europa innerhalb der Modelle relativ konsistent sind und die physikalischen Hintergründe gut verstanden werden, bleiben wesentliche Unsicherheiten bestehen. Simulationen von saisonalen Veränderungen können um den Faktor zwei oder sogar drei variieren. Es bestehen auch große Unsicherheiten der mittleren Änderungen und der Änderungen der Extreme in Bezug auf lokale Wasser- und Energiekreisläufe. Letztlich ist auch noch die natürliche Variabilität des europäischen Klimas ein großer Unsicherheitsfaktor - vor allem für kurzzeitige Simulationen (Christensen et al., 2007).

4.5.1 TEMPERATURVERÄNDERUNGEN IN EUROPA

Zur Simulation der Klimaänderungen in Europa wurden 21 Modelle herangezogen, aus deren Ergebnissen ein Mittel gebildet wurde. Jährliche Mitteltemperaturen in Europa (Abbildung 14) steigen sehr wahrscheinlich stärker an als die globalen Mittelwerte, da die kühlenden Einflüsse großer Wassermengen aus den Ozeanen auf kontinentaler Ebene weniger Auswirkungen zeigen. In Nordeuropa werden die Wintertemperaturen stärker ansteigen, in Südeuropa die Sommertemperaturen. Unter der Voraussetzung eines A1B Szenarios würden die Temperaturen in Nordeuropa in der Zeitperiode von 2080 – 2099 im Vergleich zur Periode 1980 – 1999 um ca. 2,3°C bis 5,3°C zunehmen. Für denselben Zeitraum simulieren die Modelle in Südeuropa Temperaturzunahmen von 2,2°C bis 5,1°C (Christensen et al., 2007).

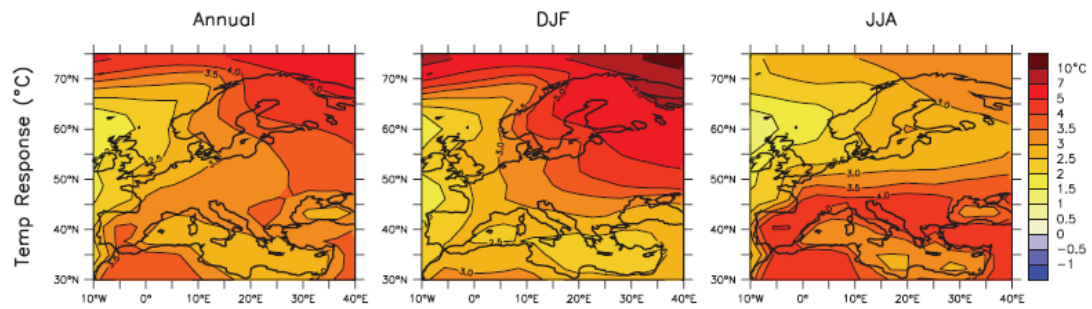


Abbildung 14: Mittlere Temperaturveränderungen in Europa, Szenario A1B, 21 Modelle
(Quelle: Christensen et al., 2007)

4.5.2 VERÄNDERUNGEN DES NIEDERSCHLAGS IN EUROPA

Wie für die Modellrechnungen der Temperaturveränderungen werden auch für den Niederschlag das A1B Szenario und das Mittel aus 21 Modellen herangezogen. Die Entwicklungen der Niederschlagsverhältnisse (Abbildung 15) im Norden und im Süden Europas weisen in entgegengesetzte Richtungen. Während in nördlichen Regionen starke Zunahmen von 0 bis +16 % zu erwarten sind, nimmt der Niederschlag im Süden mit -4 bis -27 % drastisch ab. Die höchsten Zunahmen im Norden werden im Winter simuliert und die deutlichsten Abnahmen im Süden werden im Sommer projiziert.

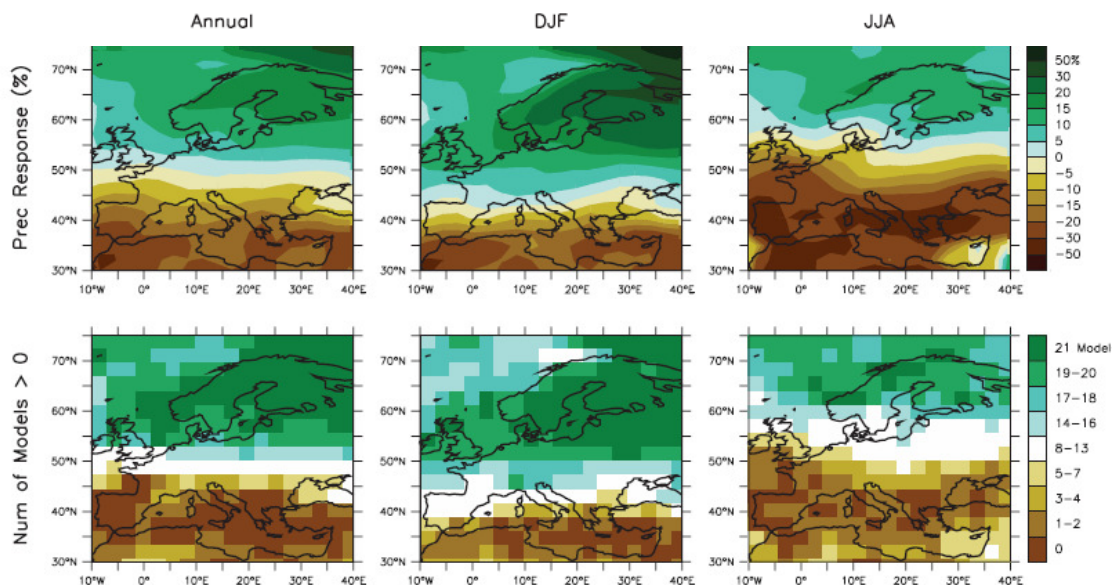


Abbildung 15: Mittlere Veränderungen des Niederschlags in Europa, Szenario A1B, 21 Modelle und Anzahl der Modelle, die eine Zunahme simulieren (Quelle: Christensen et al. 2007)

4.6 BEWERTUNG UND PROBLEME VON KLIMAMODELLEN

Modelle stellen immer nur eine vereinfachte Form der Wirklichkeit dar. Durch die hohe Komplexität des Klimasystems entstehen häufig Probleme oder Fehler bei der Darstellung in einem Modell. Besondere Probleme bei Modellrechnungen von globalen Zirkulationsproblemen treten auf bei (Schönwiese, 2003):

- der Parametrisierung subskaliger Prozesse wie z. B. Konvektion, Reibung oder Turbulenz
- Vernetzung von Prozessen, wobei Wirkungen wieder zu Ursachen werden können
- Rückkopplungseffekten und anderer Nicht-Linearitäten

Bei der Kopplung von Klimamodellen sind erneut Probleme aufgetreten. Wenn ein Ozeanmodell und ein Atmosphärenmodell getrennt voneinander rechnen, so sind die jeweiligen Randbedingungen extern angegeben. Koppelt man diese, gibt es keine externen Bedingungen mehr, sondern das Atmosphärenmodell berechnet den Windschub und das Ozeanmodell die Meeresoberflächentemperatur. Es entstehen (nicht immer) kleine Fehler und das Modell reagiert darauf indem sich die gekoppelten Systeme gemeinsam zu einem neuen Gleichgewicht hinbewegen. Dieses Phänomen, das in Modellen solcher Komplexität beinahe immer auftritt, nennt man *Klimadrift*. Da man bisher noch keine befriedigende physikalische Lösung für dieses Problem gefunden hat, wird ein nicht-physikalischer Trick angewendet: die Flusskorrektur (von Storch et al., 1999).

Weitere Schwächen der GCMs sind die grobe regionale Auflösung, die langen Rechenzeiten und die weitgehende Nicht-Berücksichtigung der Biosphäre. Hinzu kommt die ungenügende Erfassung des hydrologischen Zyklus und der damit zusammenhängenden Prozesse der Bewölkung und des Niederschlags. Insgesamt sind solche Klimamodelle stets quantitativ unsicher. In Bezug auf den Wasserkreislauf und dessen Komponenten kommt noch hinzu, dass bei der Validierung der Modellergebnisse auch eine große Unsicherheit in den Beobachtungsdaten beinhaltet ist. Vor allem bei den gemessenen Niederschlagswerten ist Vorsicht geboten. Die Temperaturentwicklungen können dagegen relativ gut wiedergegeben werden. Es muss auch berücksichtigt werden, dass es streng genommen gar kein „derzeitiges Klima“ gibt, da Klimaänderungen in allen Zeitskalen ablaufen (Schönwiese, 2003).

5 THE *PRUDENCE* PROJECT

Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects

(Christensen, J. H., Christensen, O. B.; Projekt-ID: EVK2-CT2001-00132)

Europäische Entscheidungsträger der Politik, der NGOs (non-governmental organisations) sowie der Industrie und natürlich auch die breite Öffentlichkeit brauchen detaillierte Informationen über die regionalen Veränderungen des Klimas. Nur anhand solcher Informationen können die Risiken des Klimawandels eingeschätzt und adäquate Entscheidungen getroffen werden. Es existieren zwar einige Klimaszenarien, jedoch lässt die meist grobe räumliche Auflösung der globalen Zirkulationsmodelle viele Fragen offen (Abbildung 16). So können z.B. die räumliche Struktur von Temperatur und Niederschlag in topographisch stark gegliedertem Terrain wie in den Alpen nicht ausreichend dargestellt werden. Die Einbindung von regionalen und lokalen atmosphärischen Zirkulationen, wie konvektive mesoskalige Systeme oder Leezyklogenese sowie Prozesse, die sich auf einer kleinen zeitlichen Skala bewegen, ist unzulänglich (<http://prudence.dmi.dk>).

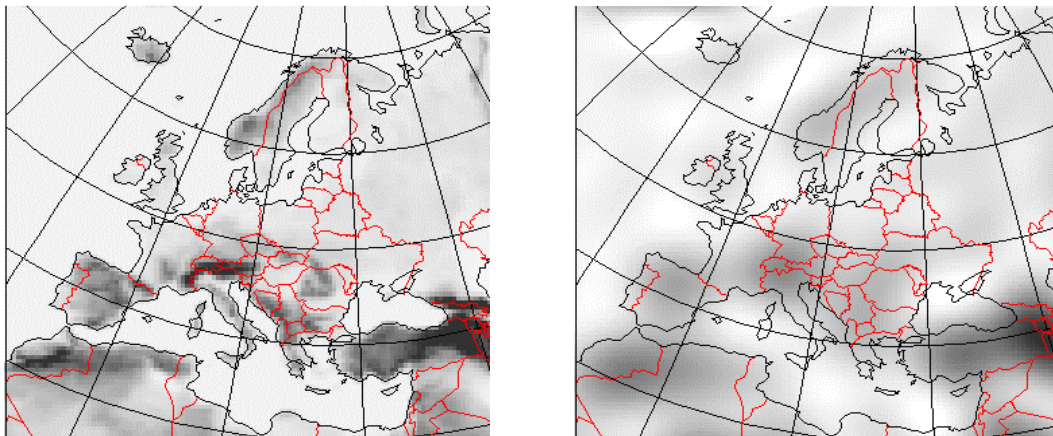


Abbildung 16: Darstellung der räumlichen Auflösung eines regionalen Klimamodells (50 km) im Vergleich mit der Auflösung eines globalen Zirkulationsmodells (~300 km) (Quelle: Prudence, 2001)

Man beschloss also im Jahre 2001 ein Projekt in die Wege zu leiten, im Zuge dessen die Unzulänglichkeiten der globalen Zirkulationsmodelle anhand der Darstellung und Entwicklung kleinräumiger, regionaler Klimamodelle über Europa zu verbessern. Mehr als 20 Forschungsgruppen sind an diesem Projekt beteiligt.

Die Ziele des *PRUDENCE* – Projektes waren wie folgt definiert (<http://prudence.dmi.dk>):

- Die räumliche Auflösung der Modelle sollte drastisch verringert werden, um auch kleinräumige Phänomene und Prozesse über topographisch stark gegliedertem Terrain erfassen zu können
- Quantifizierung der Sicherheiten und Unsicherheiten in Bezug auf die Darstellung von Klimaszenarien und deren Auswirkungen, indem eine

Reihe von Klimamodellen und das Wissen mehrerer Experten zur Verfügung gestellt werden

- Interpretation der Ergebnisse in Zusammenarbeit mit Entscheidungsträgern, um sich möglichen Klimaänderungen anpassen zu können oder die Auswirkungen zu lindern.

5.1 KLIMASIMULATIONEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET

Im folgenden Kapitel werden mögliche zukünftige Klimaänderungen im Untersuchungsgebiet anhand einer Auswahl von vier verschiedenen regionalen Klimamodellen aufbereitet, bewertet und kritisch betrachtet. Die Modelldaten wurden auf der von *Prudence* bereitgestellten Datenplattform heruntergeladen und graphisch dargestellt, um die Modellergebnisse besser vergleichen zu können. Es wurden je vier Modellergebnisse der hydroklimatologischen Parameter Niederschlag, Abfluss und Temperatur untersucht um, einen Überblick über die Veränderungen zu bekommen.

5.1.1 AUSGEWÄHLTE MODELLE

Um eine Übersicht zu bekommen und die Tendenzen der Entwicklung besser abschätzen zu können, wurden hier vier Modelle zum Vergleich ausgewählt, von denen jeweils die Klimasimulationen für den Zeitraum 1961-1990 im Vergleich zu 2071-2100 unter Annahme eines A2 Szenarios für Österreich und den Untersuchungsraum dargestellt werden. Die regionalen Klimamodelle werden an den Außenrändern von dem globalen Zirkulationsmodell HadAM3H des Hadley Center angetrieben.

1) **CHRM**

Dieses Modell wurde von der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich entwickelt. Es handelt sich hierbei um ein LAM (limited area model), das seine Wurzeln im Wettervorhersagemodell des deutschen und schweizerischen meteorologischen Service HRM hat. Das Modell basiert auf einem normalen Längen-/Breitengradnetz mit einer Auflösung von ca. 0,5° (ca. 55 km) und 20 vertikalen Niveaus. Die Modelle CHRM und REMO haben den selben physikalischen

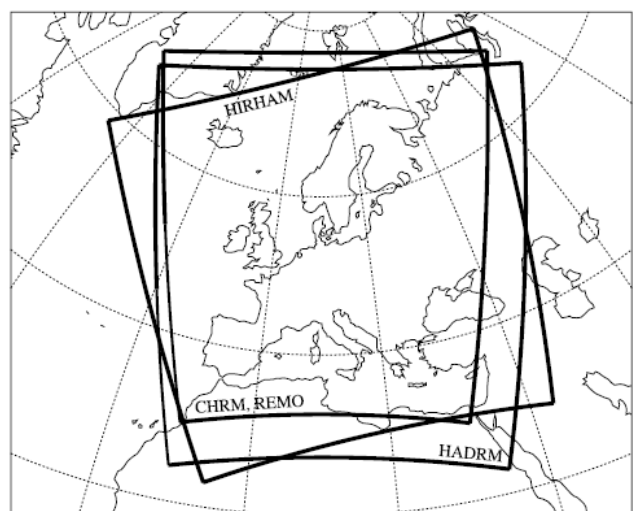


Abbildung 17: Rechenbereiche der regionalen Klimamodelle HIRHAM, CHRM, REMO und HADRM (Quelle: Frei et al., 2003)

Kern, unterscheiden sich aber in der Parametrisierung.

2) **HIRHAM**

Das Danish Meteorological Institute (DMI) verwendet das Modell HIRHAM. Das Modell, das hier verwendet wird ist eine neuere Version des HIRHAM4. Es wurde von Christensen und van Meijgaard 1992 entwickelt und danach von Christensen mehrmals überarbeitet. Im Zuge der Überarbeitung wurden hoch aufgelöste Datensätze der physiographischen Oberflächentopographie und der Landnutzung hinzugefügt. Die physikalische Parametrisierung wurde aus dem globalen Zirkulationsmodell ECHAM4 herangezogen. Die Auflösung mit einem Raster von $0,44^\circ$ (ca. 50 km) ist etwas genauer als jene des CHRM. Die Vertikalschichtung hat 19 Levels.

3) **RACMO**

RACMO2 kombiniert die Charakteristika der Landoberfläche und den dynamischen Kern des numerischen Wettervorhersagesystems HIRLAM mit der physikalischen Parametrisierung des ECMWF (European Center for Medium Range Forecasting). Es ist das Modell des Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) und hat eine horizontale Auflösung von $0,44^\circ$ (ca. 50 km). Das Modell verwendet die vertikale Auflösung des ECMWF und rechnet somit mit 31 Schichten.

4) **REMO**

Das regionale Klimamodell REMO ist eine Kombination aus dem Europamodell/Deutschlandmodell des deutschen Wetterservice und der Parametrisierungen des ECHAM4 und wurde am Max-Planck-Institut (MPI) in Hamburg entwickelt. Die Parameter der Erdoberfläche basieren auf einem globalen Datensatz von 1 km Auflösung der Hauptökosystemtypen. REMO hat den selben dynamischen Kern wie CHRM und verwendet die selbe physikalische Parametrisierung wie HIRHAM (Prudence, Déqué et al., 2007).

Tabelle 20: Metadaten der regionalen Klimamodelle CHRM, HIRHAM, RACMO und REMO und des GCM HadAM3H

	CHRM	HIRHAM	RACMO	REMO	HadAM3H
Rasterauflösung	$0,5^\circ$ (55 km)	$0,44^\circ$ (50 km)	$0,44^\circ$ (50 km)	$0,5^\circ$ (55 km)	$1,875^\circ \times 1,25^\circ$
Raster (lat*lon)	81 x 91	110 x 104	114 x 110	97 x 109	global, 81 x 91
Südpol/Rotation	10°E , $32,5^\circ\text{S}$	27°E , 37°S	23°E , 28°S	10°E , $32,5^\circ\text{S}$	-
Vertikale Schichten	20	19	31	19	19
Bodenwärmeschichten	4	5	4	5	-
Bodenfeuchteschichten	3	1	4	1	-

Zur Validierung von regionalen Klimamodellen werden Beobachtungswerte mit Modellsimulationen verglichen, um die Modellgüte verbessern zu können. Es handelt sich hierbei um einen iterativen Prozess und es gibt keine abschließende Bewertung für die Modellqualität. Angetrieben werden solche Modelle bei der Validierung durch atmosphärische Reanalysen. Das sind assimilierte großskalige Beobachtungen.

Die Abbildung 18 zeigt einen Vergleich der Modelle CHRM und HIRHAM mit beobachteten Niederschlagswerten. Dargestellt ist der Niederschlag im Winter über dem Alpenbogen, wobei die beobachteten Werte (oberstes Diagramm) aus dem Alpenen Niederschlagsdatensatz von Frei und Schär (1998) herangezogen wurden. Darunter ist die Simulation des CHRM Modells dargestellt und zu unterst die Simulation das HIRHAM. Die Vergleichsperiode ist der 15-jährige Zeitraum, der durch die Reanalyse des ECMWF abgedeckt wird. Es ist deutlich ein Niederschlagsband am Alpennordrand zu erkennen, jedoch unterscheiden sich die Modelle beträchtlich von den beobachteten Daten und weisen zum Teil große Fehler auf. Es wird nicht nur die Amplitude der erwähnten Niederschlagsanomalie falsch errechnet, sondern auch die Position. Des weiteren wird der Gebietsniederschlag südlich des Alpenhauptkamms deutlich unterschätzt (Schär et al. 2000).

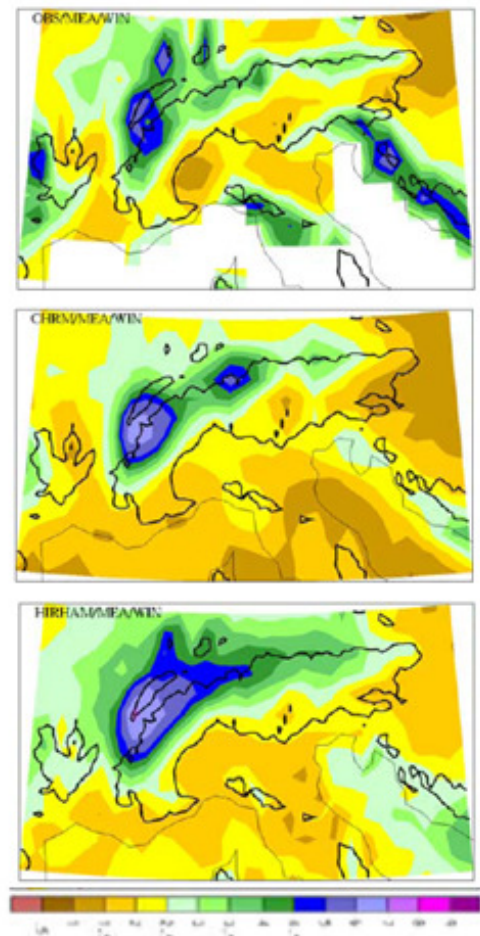


Abbildung 18: Winterniederschlag von verschiedenen Modellen (Beobachtung, CHRM, HIRHAM) Angaben in mm/Tag (Quelle: Schär et al. 2000)

5.1.2 ERGEBNISSE DER KLIMASIMULATIONEN

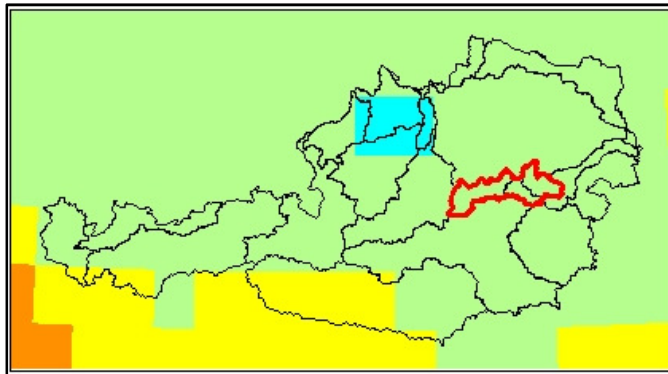
Das regionale Klimamodell der ETH Zürich, CHRM, zeigt eine leichte Abnahme des Niederschlags im Untersuchungsgebiet zwischen 0 und -0,5 mm/Tag an (Karte 8). Dies bedeutet eine Abnahme von bis zu 182,5 mm des Jahresniederschlags des mittleren Niederschlags der Kontrollperiode im Vergleich zum Mittel der 30-jährigen Periode des Szenarios. Nahezu in ganz Österreich wird von diesem Modell eine solche Entwicklung simuliert. Die Ergebnisse der HIRHAM-Simulationen zeigen fast dieselben Veränderungen auf, wobei hier im Westen des Untersuchungsgebietes steigende Tendenzen

dargestellt werden. Im Gegensatz hierzu weisen die Klimasimulationen der Modelle RACMO und REMO steigende Niederschlagsverhältnisse auf, die ein Ausmaß von bis zu +1 mm/Tag (+ 365 mm bis zum Ende des Jahrhunderts) erreichen können.

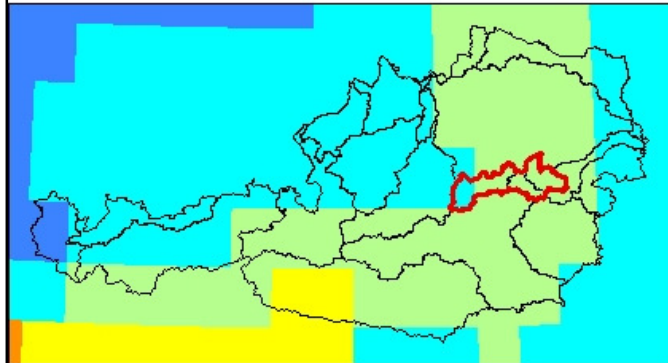
In Bezug auf die Abflusswerte zeigen die Ergebnisse des CHRM im Untersuchungsraum dieselben Entwicklungen wie die des Niederschlags (Karte 9). Es wird eine leichte Abnahme von bis zu -0,5 mm/Tag errechnet. Das RACMO Modell zeigt ebenso solche Tendenzen auf. Es wird hier im Osten des Untersuchungsgebietes sogar von einer noch größeren Abnahme der Abflussspenden bis zu -1 mm/Tag ausgegangen. Die beiden anderen Modelle hingegen simulieren im Untersuchungsraum einen Anstieg der Abflüsse bis zu -0,5 mm/Tag.

In Bezug auf die Temperaturentwicklungen (Karte 10) zeigen die Modellsimulationen einen eindeutigen Trend zur Temperaturzunahme, jedoch wird die Höhe der Zunahme unterschiedlich errechnet. Das Schweizer Modell zeigt die moderate Erwärmung der vier Modelle mit einer Zunahme der Temperatur um ca. 3 – 3,5°C an. Das RACMO und das HIRHAM simulieren eine etwas stärkere Erhöhung mit Werten zwischen 3,5 – 4°C Temperaturzunahme im Untersuchungsraum. Die REMO-Daten deuten auf eine noch drastischere Änderung der Temperaturverhältnisse mit 4 – 4,5°C Erwärmung hin.

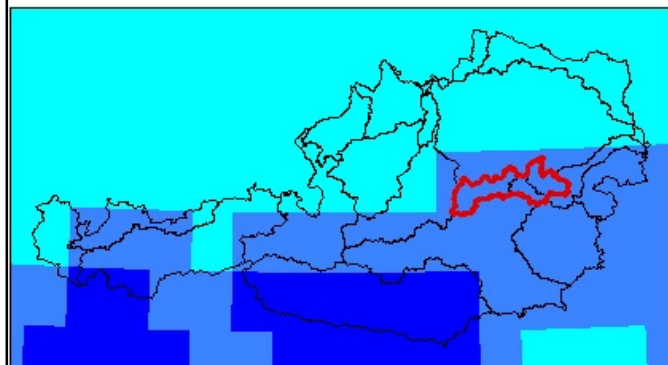
Insgesamt stimmen die Modellsimulationen nur in der Temperaturentwicklung überein, da jedes Modell von einer Zunahme der Temperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ausgeht. Die Stärke der Zunahme variiert allerdings von +3°C bis zu +4,5°C. Die Richtung der Entwicklungen des Niederschlags und des Abflusses im Untersuchungsgebietes stimmen nur bei den Modellen CHRM und REMO überein. Allerdings besagen die Simulationen des Schweizer Modells, dass es zu einer Abnahme des Niederschlags sowie des Abflusses kommen wird, wogegen das deutsche Modell eine Zunahme dieser Parameter errechnet. Die Simulationen des Abflusses lassen ein einheitliches Muster erkennen, das eine Zunahme im südwestlichen Bereich Österreichs anzeigt und eine Abnahme im Nordosten. Die räumliche Ausdehnung dieses Musters variiert jedoch von Modell zu Modell. In Bezug auf die Niederschlagsverhältnisse zwischen 2071-2100 sind keine einheitlichen Tendenzen zu erkennen. Zwei Modelle simulieren eine Zunahme, zwei eine Abnahme des Niederschlags im Untersuchungsraum.



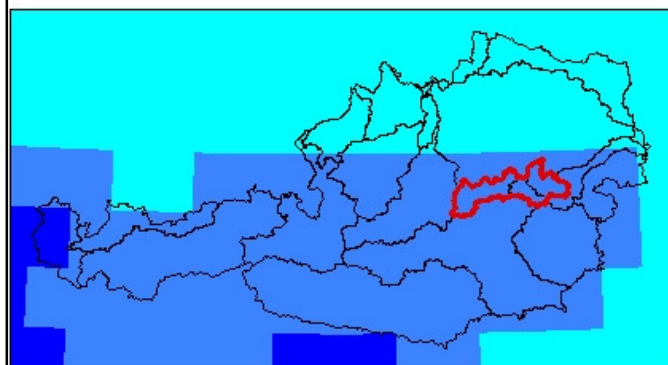
**CHRM -
Modell der ETH Zürich**



**HIRHAM -
Modell der MET.NO**

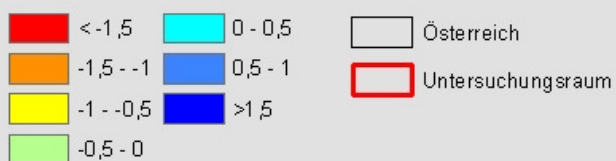


**RACMO -
Modell des KNMI**



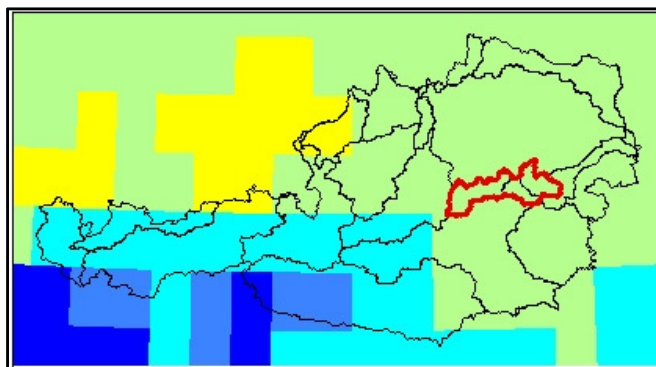
**REMO -
Modell des MPI**

**Niederschlagsveränderungen
in mm/Tag**

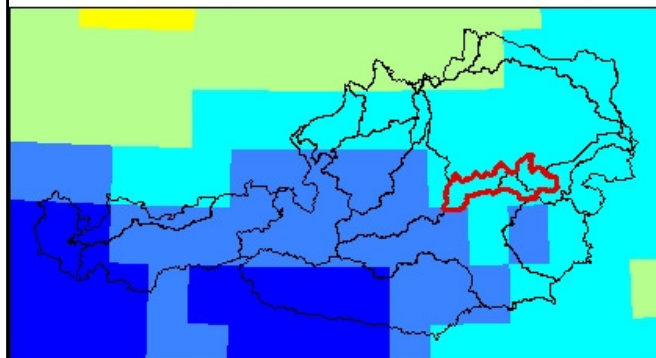


Datum: 06/2008
Quellen: Hydrologischer Atlas,
Prudence
Eigene Digitalisierung

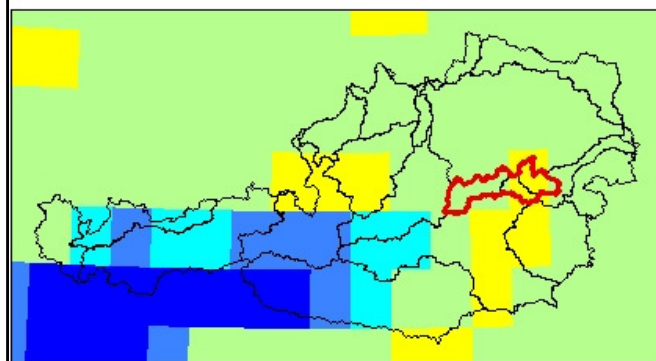
Karte 8: Simulationen der Niederschlagsveränderungen



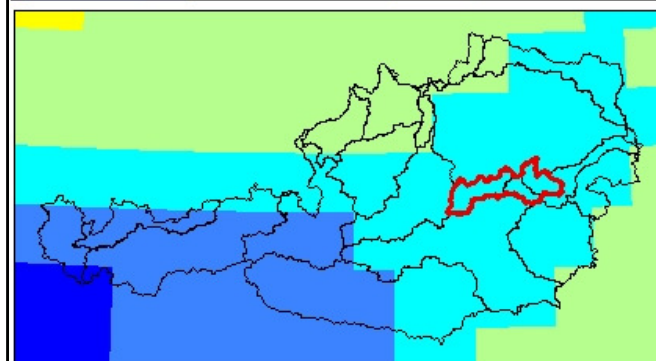
**CHRM -
Modell der ETH Zürich**



**HIRHAM -
Modell der MET.NO**

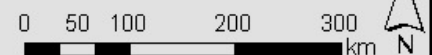
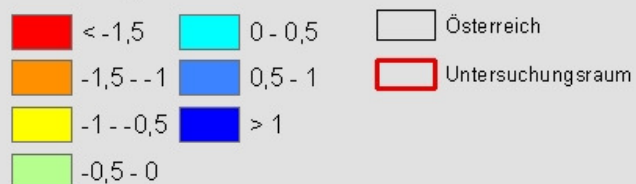


**RACMO -
Modell des KNMI**



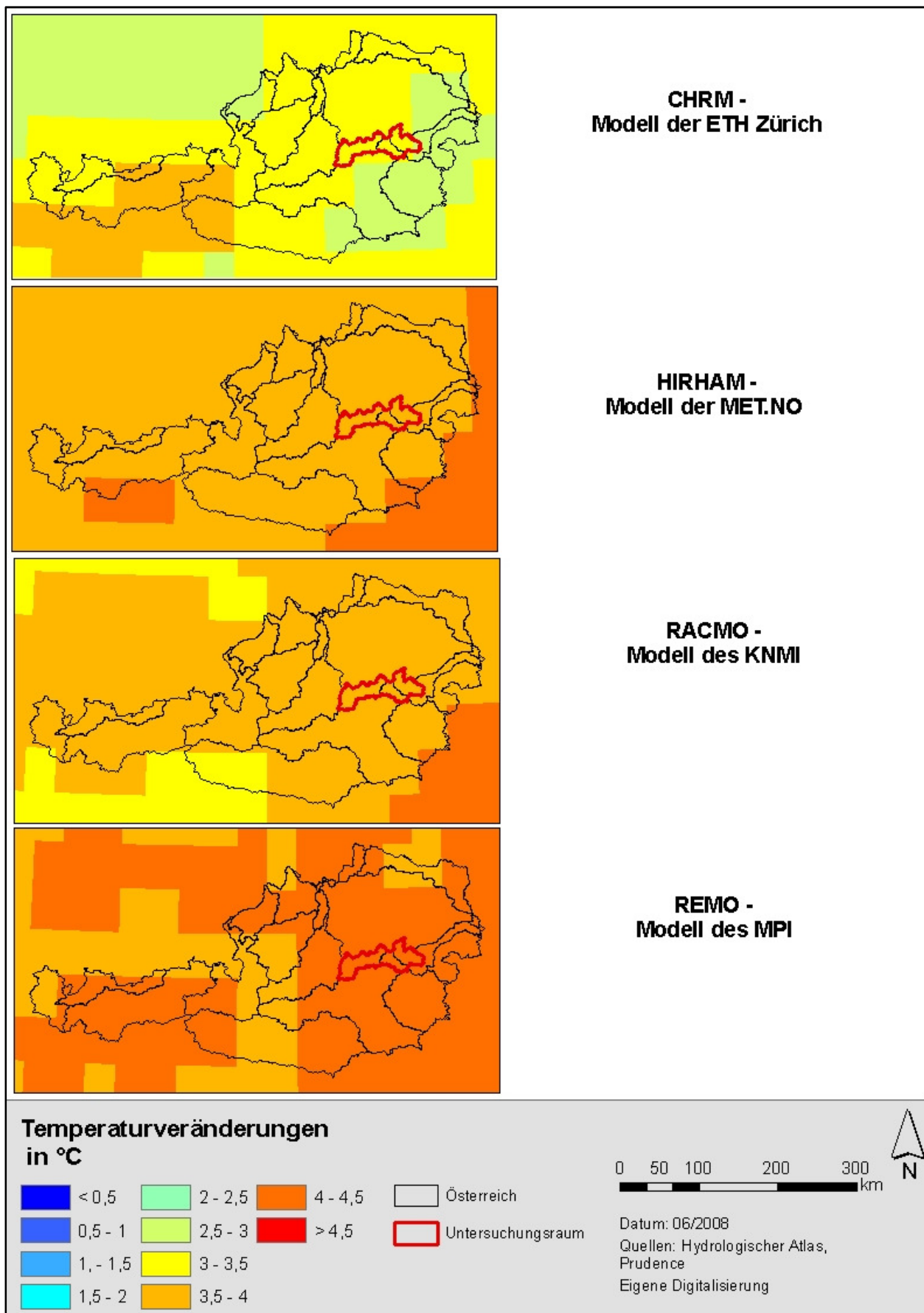
**REMO -
Modell des MPI**

**Abflussveränderungen
in mm/Tag**



Datum: 06/2008
Quellen: Hydrologischer Atlas,
Prudence
Eigene Digitalisierung

Karte 9: Simulationen der Abflussveränderungen



Karte 10: Simulationen der Temperaturveränderungen

6 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Ziel dieser Arbeit war es, Änderungen der hydroklimatologischen Variablen Niederschlag, Abfluss und Temperatur im Großraum des Einzugsgebietes der Wiener Hochquellenleitungen anhand von statistischen Langzeitanalysen festzustellen und einen Ausblick auf mögliche zukünftige Klimaänderungen in diesem Gebiet durch die Darstellung von Ergebnissen der Simulationen von verschiedenen regionalen Klimamodellen zu geben.

Zur Analyse der Beobachtungsdaten wurden Daten aus den Hydrographischen Landesdiensten der Länder Niederösterreich und Steiermark, sowie der ZAMG und der Wiener Wasserwerke herangezogen. Als Kriterium für die Langzeitreihen wurde eine Mindestlänge von 50 Jahren festgelegt, was vor allem bei Abflussdaten zu Schwierigkeiten führte, da es erst seit Mitte des letzten Jahrhunderts einheitliche Messverfahren des Abflusses in m^3/s gibt. Die Abflussmessreihen sind daher mit durchschnittlich nur 45 Jahren Dauer, deutlich kürzer als die Niederschlags- und Temperaturzeitreihen. Obwohl an einigen Pegeln im Untersuchungsgebiet bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts Wasserstandsmessungen durchgeführt wurden, konnten diese Daten nicht herangezogen werden, da die benötigten Umrechnungskurven von cm Wasserstand auf Abflusswerte in m^3/s nicht zur Verfügung standen.

Um möglichst lange Zeitreihen der Niederschlags- und Temperaturwerte zu bekommen, wurden die älteren Daten, die nicht in digitaler Form vorlagen, aus hydrographischen Jahrbüchern digitalisiert. Die längsten Zeitreihen reichen daher bis ins Jahr 1893 zurück. Im Vergleich zu diesen Daten wurde auch die Wasserbilanz aus dem Hydrologischen Atlas Österreichs im Untersuchungsgebiet dargestellt. Die Datengrundlage des Atlas reicht allerdings nur bis 1951 zurück.

Die Signifikanz eines Trends einer Zeitreihe wurde mit einem Cox-Stuart-Test ermittelt. Dieser Test ist parameterfrei und kann somit auf die nicht normalverteilte, saisonal abhängige Datengrundlage angewendet werden. Zur Feststellung der Größe des Trends wurde eine Lineare Regression herangezogen. Es wurden nicht nur Jahrestrends ermittelt, sondern die Daten wurden saisonal aufgesplittet, um somit auch Veränderungen des saisonalen Verhaltens zu erkennen.

Die zusammengefassten Ergebnisse der Trendanalyse:

- Die deutlichsten Trendentwicklungen konnten im Sommer beobachtet werden. Es kam zu einem Anstieg der Temperaturentwicklung mit Durchschnittswerten von $+0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ während des letzten Jahrhunderts. Gleichzeitig wurden signifikante negative Entwicklungen des Niederschlags und der Abflusswerte beobachtet.
- Im Winter konnten kaum positive oder negative Entwicklungen festgehalten werden. Nur die Niederschlagsentwicklungen weisen leicht

negative Tendenzen auf. Insgesamt gibt es jedoch keine nennenswerten Veränderungen in eine bestimmte Richtung im Winter.

- Im Frühjahr und im Herbst sind aus den Langzeitanalysen keine signifikanten Trends in eine Richtung zu erkennen. Die Wasserbilanz zeigt im Herbst jedoch einen starken Anstieg der Wasservorratspeicherung, was sehr gut mit den Zunahmen der Abflüsse in dieser Saison korreliert.
- Im Beobachtungszeitraum ergaben sich abnehmende Niederschlagsjahressummen im niedriger gelegenen Osten des Untersuchungsraums und zunehmende im Westen, dem gebirgigeren Terrain.

Bei der Analyse der Beobachtungswerte ist es besonders wichtig, auf das Zeitfenster zu achten, auf das sich die Daten beziehen. Die Untersuchungen ergaben bei kürzeren Zeitreihen - bis ca. 50 Jahre, wie sie bei den Abflüssen und der saisonalen Wasserbilanz vorlagen, viel öfters signifikante Trends als bei den Zeitreihen, die bis zu über 100 Jahre zurückreichen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist auch, dass der Niederschlag im Untersuchungsgebiet nicht repräsentativ gemessen werden konnte, da sich mehr als drei Viertel aller Niederschlagsmessstationen unter dem Niveau von 750 m über NN befinden. Das Untersuchungsgebiet liegt jedoch zum größten Teil auf einer Höhenlage zwischen 750 m und 1500 m.

Der zweite Teil der Arbeit sollte einen Überblick zum derzeitigen Wissensstand der Klimamodellierung geben sowie die Probleme und Unsicherheiten in Klimamodellen aufzeigen. Um einen Ausblick zur Entwicklung des Klimas im Untersuchungsgebiet zu geben, wurden die Ergebnisse der Simulationen von vier verschiedenen regionalen Klimamodellen für diesen Raum dargestellt. Die Daten der Modelle wurden von der Datenplattform des Projekts „*Prudence*“ heruntergeladen.

Zunächst wurden Teile des 4. Sachstandberichts des IPCC zusammengefasst. Es wurden die Ergebnisse der Modell-Ensembles der Globalen Zirkulationsmodelle und die Multi-Modell Ergebnisse der regionalen Klimamodelle dargestellt.

Die Ergebnisse der GCMs weisen auf eine globale Erhöhung der Temperaturwerte hin, während die Erwärmung der Kontinente stärker sein wird als die globalen Mittelwerte. Je nach Emissionszenario kommt es zu einer Erhöhung der globalen Mitteltemperatur zwischen +2°C und +3,5°C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Mit erhöhten Temperaturwerten erhöhen sich, nach den Rechnungen der GCMs, auch die Niederschlagssummen. Die Unsicherheiten im Bezug auf die Niederschlagsveränderungen sind allerdings größer als die für die Temperaturveränderungen. In den höheren Breiten ist im Sommer wie auch im Winter eine Zunahme des Niederschlags errechnet worden.

Durch Änderungen des globalen Klimas ändern sich auch die Art, die Häufigkeit und die Intensität von Extremereignissen. Es ist bereits ein Anstieg der Häufigkeit und Intensität von Dürreperioden und Starkregenereignissen beobachtet worden. In einem wärmeren Klima simulieren fast alle Modelle eine höhere Sommertrockenheit und höhere Niederschlagssummen im Winter in den meisten Regionen der mittleren und höheren nördlichen Breiten. Vieles deutet darauf hin, dass in Zukunft intensivere Regenereignisse stattfinden werden und es dazwischen längere Perioden mit nur wenig Niederschlag geben wird.

Um einen genaueren Überblick zu möglichen zukünftigen Klimaänderungen in Europa zu bekommen, wurden die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle des IPCC Reports zusammengefasst. Auf dieser Ebene bestehen weitaus mehr Unsicherheiten als bei globaler Betrachtung. Die größten Unsicherheiten gibt es in Bezug auf saisonale Veränderungen, die um den Faktor zwei oder sogar drei variieren können, sowie die mittleren Änderungen und die Änderungen der Extreme der lokalen Wasser- und Energiekreisläufe. Letztlich ist auch noch die natürliche Variabilität des europäischen Klimas ein großer Unsicherheitsfaktor.

Die Simulationen des Multi-Modell Ansatzes der regionalen Klimamodelle ergeben einen stärkeren Anstieg der Wintertemperaturen in Nordeuropa und eine stärkere Zunahme der Sommertemperaturen in Südeuropa. Österreich liegt in einem Übergangsgebiet und erwartet, nach diesen Berechnungen und unter Annahme eines A1B Szenarios, einen durchschnittlichen Temperaturanstieg von ca. $+3^{\circ}\text{C}$ bis zur Zeitperiode 2080-2099 im Vergleich zum Zeitraum 1980-1999. Auch im Hinblick auf die Niederschlagsveränderungen befindet sich Österreich in einem Übergangsgebiet. Für den Norden Europas simulieren die Modelle eine starke Zunahme der Niederschlagssummen, während im Süden mit einem drastischen Rückgang zu rechnen ist. In Österreich werden für die Wintersaison Zunahmen erwartet und im Sommer eine Abnahme des Niederschlags.

Für die Klimasimulationen im Untersuchungsgebiet wurden vier bekannte Modelle europäischer Forschungsgruppen herangezogen. Es handelt sich hierbei um das regionale Klimamodell der ETH Zürich, CHRM, das Modell des Dänischen Meteorologischen Instituts, HIRHAM, das Modell des Niederländischen Meteorologischen Instituts, RACMO, und das Modell des deutschen Max-Planck-Instituts, REMO.

Die Modellergebnisse weichen teilweise stark voneinander ab, zeigen sogar in verschiedene Richtungen. Nur bei Betrachtung der Temperaturentwicklungen wurde ein eindeutiger Trend zur Zunahme dargestellt.

Zusammenfassung der Ergebnisse der regionalen Klimamodelle im Untersuchungsgebiet:

- Die Simulationsergebnisse der Temperaturveränderungen variieren von einer Zunahme von $+3^{\circ}\text{C}$ bis $+4,5^{\circ}\text{C}$.
- Zwei Modelle (CHRM, HIRHAM) zeigen eine leichte Abnahme des Niederschlags an. HIRHAM zeigt allerdings ganz im Osten des Untersuchungsgebietes eine leichte Zunahme an. Die beiden anderen

Modelle errechnen eine Zunahme des Niederschlags im Untersuchungsraum.

- In Bezug auf den Abfluss zeigt das schweizerische Modell CHRM dieselben Entwicklungen wie dessen Niederschlagssimulationen, nämlich eine leichte Abnahme. RACMO errechnet ebenfalls eine Abnahme. Die beiden anderen Modelle weisen auf eine Zunahme des Abflusses hin.

Insgesamt wird deutlich, dass die Modellierung des Klimas auf regionaler Ebene vor allem in Bezug auf den hydrologischen Kreislauf noch sehr große Unsicherheiten birgt und die Ergebnisse stark voneinander abweichen. Die Temperaturentwicklungen werden einheitlicher dargestellt.

Bei der Interpretation dieser Daten ist zu berücksichtigen, dass eine Differenz zwischen zwei Modellsimulationen (Szenario minus Kontrolllauf) dargestellt wird. Kann das Modell also die beobachteten Entwicklungen nicht gut wiedergeben, so bleibt dieser Fehler im Modell enthalten und rechnet mit demselben Fehler die Simulationen für die Zukunft. Es ist also wichtig, zuerst den Kontrolllauf mit den erhobenen Daten zu vergleichen, was im Rahmen dieser Arbeit leider nicht möglich war. Bei dieser „Kontrolle“ kommt auch noch hinzu, dass wiederum große Unsicherheiten und Fehler in den Beobachtungsdaten von hydrologischen Parametern enthalten sein können.

Neben diesen Schwierigkeiten gibt es auch noch viele Unzulänglichkeiten in den Modellen selbst. In der Parametrisierung subskaliger Prozesse, der Vernetzung von Prozessen, wobei Wirkungen wieder zu Ursachen werden können, Rückkopplungseffekten und anderer Nicht-Linearitäten ist immer noch eine große Fehlerquelle enthalten, die schwer zu quantifizieren ist.

Im Allgemeinen ist die Modellierung des Klimasystems für die Zukunft mit Vorsicht zu betrachten. Es handelt sich hierbei nicht um Prognosen, sondern lediglich um mögliche Entwicklungen des Klimas.

KONKRETE AUSWIRKUNGEN AUF DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET UND AUSBLICK

Aufgrund der Analyse der Langzeitmessreihen und der Darstellung der regionalen Klimamodelle, ist ein weiterer Anstieg der Temperatur im Untersuchungsgebiet bis zum Ende des Jahrhunderts sehr wahrscheinlich. In der Vergangenheit zeigte sich ein eindeutiger Trend zum Anstieg der Temperatur im Sommer während des letzten Jahrhunderts. Die gleichzeitig abnehmenden Höhen des Niederschlags und des Abflusses in dieser Saison könnten sich negativ auf die Verfügbarkeit von Wasser auswirken. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle zeigen, unter Annahme eines A2 Szenarios, einheitlich eine Temperaturzunahme an, die von +3°C bis +4,5°C je nach Klimamodell variiert. Hier wurde allerdings nur mit Jahresmittelwerten gearbeitet. Eine

saisonale Untersuchung der regionalen Entwicklungen für die Zukunft könnte aufzeigen ob sich der auffallende Temperaturtrend im Sommer fortsetzt.

Die Niederschlagsjahressummen haben während des Untersuchungszeitraums im Westen des Untersuchungsgebiets zugenommen und im Osten abgenommen. Die Ergebnisse der Klimamodelle zeigen keinen einheitlichen Trend auf. Allein das Modell HIRHAM des dänischen meteorologischen Instituts errechnet eine ähnliche Entwicklung für die Zukunft, als in der Vergangenheit ersichtlich wurde, denn auch hier werden Zunahmen des Niederschlags im Westen und Abnahmen im Osten simuliert. Allerdings ist es nicht gesagt, dass sich ein Trend aus der Vergangenheit exponentiell weiterentwickelt. In diesem Zusammenhang wäre es für weitere Untersuchungen sinnvoll zu eruieren welches Modell die Vergangenheit am konsistentesten wiedergibt.

Die Höhe der Abflüsse ist während der letzten 50 Jahre leicht angestiegen. Saisonal betrachtet werden vor allem im Herbst Zunahmen verzeichnet. Ein sehr ähnliches Bild zeigt die Entwicklung der Wasserbilanz. Die Klimamodelle geben, ähnlich wie beim Niederschlag, auch hier keinen einheitlichen Trend wieder.

Für die Wiener Wasserwerke sind unter anderem auch Entwicklungen von Extremereignissen von großer Bedeutung, da Starkniederschlagsereignisse die Verfügbarkeit von sauberem Wasser beeinträchtigen können. Global gesehen kann eine wärmere Atmosphäre zu einem Anstieg von Starkniederschlag führen, da sie durch die erhöhte Temperatur über eine höhere Wasserspeicherkapazität verfügt. Wie sich diese Entwicklung auf die lokale Ebene des Untersuchungsgebiets auswirkt kann hier nicht beantwortet werden. Die Analyse von Extremereignissen stellt sich als problematisch dar, weil die Datengrundlage zu gering ist um statistisch sinnvolle Aussagen über einen längeren Zeitraum zu treffen.

Zukünftiger Forschungsbedarf besteht also vor allem in der Simulation des Wasserkreislaufs und der Entwicklung von Extremereignissen.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- Bryan, K. (1969): *A numerical model for the study of the circulation of the world oceans*. In: Journal of Computational Physics, Vol. 4, S 347-376.
- Christensen, J.H., et al. (2007): Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Christensen, J. H., Christensen, O. B. (2001): The PRUDENCE-Project, Projekt-ID: EVK2-CT2001-00132, <http://prudence.dmi.dk/> (Zugriff: 08/2008)
- Cubasch, U. (2002): *Perspektiven der Klimamodellierung*. In: Klima - Das Experiment mit dem Planeten Erde. – Walter Hauser, Hrsg., Konrad Theiss Verlag GmbH. – Stuttgart.
- Déqué, M. et al. (2007): *An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections*. In: Climatic Change, Vol. 81, S. 53-70. - Springer Verlag. – Niederlande.
- Djekic, Z. (2001): *Klimastation – Interaktive Lernsoftware zur Klassifikation von W. Köppen*. – Windows, Version 1.0.0
- Edwards, P. N. (2002): *Modelle, Daten, Ungewissheit und die Politik in der weltweiten Klimawissenschaft*. In: Klima - Das Experiment mit dem Planeten Erde. – Walter Hauser, Hrsg., Konrad Theiss Verlag GmbH. – Stuttgart.
- Frei, C. et al. (2003): *Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps*. – In Journal of Geophysical Research, Vol. 108.
- Fürst, J. et al. (2007): *Trends in Niederschlag und Abfluss*. In: BMLFUW (ed.) Hydrologischer Atlas Österreichs. - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. – Wien.
- Gates, W. L. (2003): *Ein kurzer Überblick über die Geschichte der Klimamodellierung*. In: Deutscher Wetterdienst, Hrsg., Promet – Meteorologische Fortbildung. Numerische Klimamodelle – Was können sie wo müssen sie verbessert werden? Teil II: Modellierung natürlicher Klimaschwankungen. - Offenbach am Main, Jahrgang 29, Heft 1-4, S 3-5.
- Le Treut, H., et al. (2007): Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis,

- K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Manabe, S., Wetherald, R. T. (1967): *Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity*. In: Journal of the atmospheric sciences, Vol. 24, No. 3, S 241-259.
- Manabe, S. et al. (1991): *Transient Responses of a Coupled Ocean–Atmosphere Model to Gradual Changes of Atmospheric CO₂. Part I. Annual Mean Response*. In: Journal of climate, Vol. 4, S 785-818.
- Meehl, G.A., et al. (2007): Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nakicenovic, N. et al. (2001): Special Report on Emission Scenarios. In: *Climate Change 2001: Contribution of Working Group III to the third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Watson, R. T. et al. (ed.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Phillips, N. A. (1956): *The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment*. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 82, No. 354, S. 535-539
- Roeckner, E. (2003): *Allgemeine Zirkulationsmodelle, Atmosphäre*. In: Deutscher Wetterdienst, Hrsg., Promet – Meteorologische Fortbildung. Numerische Klimamodelle – Was können sie wo müssen sie verbessert werden? Teil II: Modellierung natürlicher Klimaschwankungen. - Offenbach am Main, Jahrgang 29, Heft 1-4, S 6-14.
- Sachs, L. (2002): *Angewandte Statistik, Anwendung statistischer Methoden*. 10. Auflage 2002, Springer-Verlag. - Berlin, Heidelberg.
- Schär, C. et al. (2000): *Regionale Klimamodelle – Möglichkeiten und Grenzen*. – Kliwa Symposium 2000.
- Schönwiese, C.-D. (2003): *Klimatologie*. 2. Auflage 2003, UTB 1793. - Stuttgart.
- Schönwiese, C.-D. (2000): *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. 3. Auflage 2000, Gebrüder Bornträger-Verlag. - Berlin, Stuttgart.
- Von Storch et al. (1999): *Das Klimasystem und seine Modellierung – Eine Einführung*. Springer Verlag. - Berlin u. a..
- Zepp, H. (2002): *Grundriß Allgemeine Geographie: Geomorphologie*. UTB 2164, Verlag Ferdinand Schöningh. - Paderborn u. a..

Internetquelle:

<http://prudence.dmi.dk/> Zugriff: 08/2008

8 ANHANG

Im Anhang werden zur genaueren Betrachtung der analysierten Daten des ersten Teils der Diplomarbeit alle Messreihen nochmals einzeln in Form von Diagrammen angeführt.

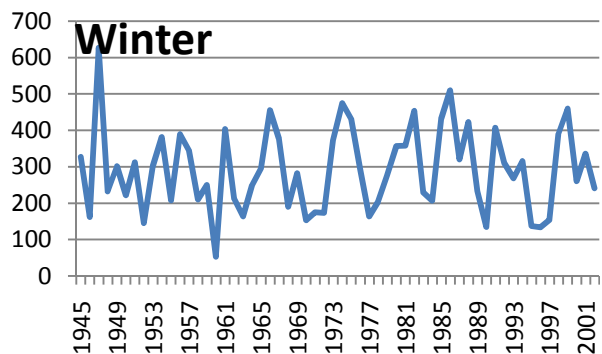
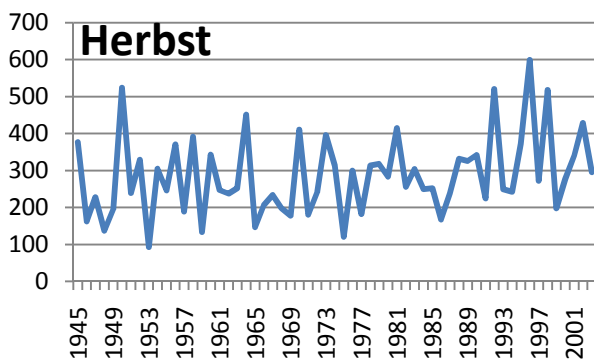
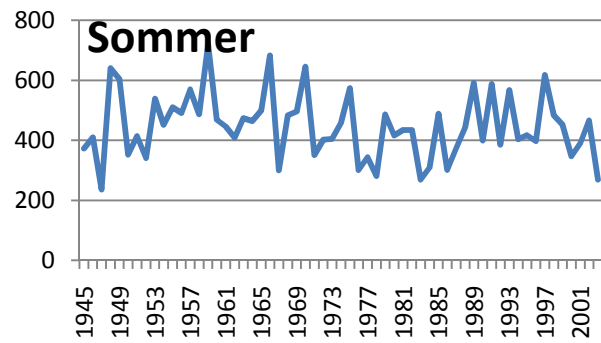
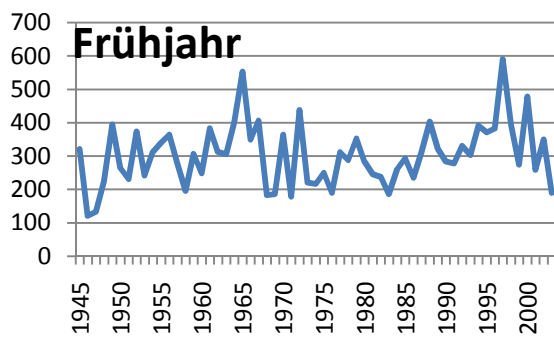
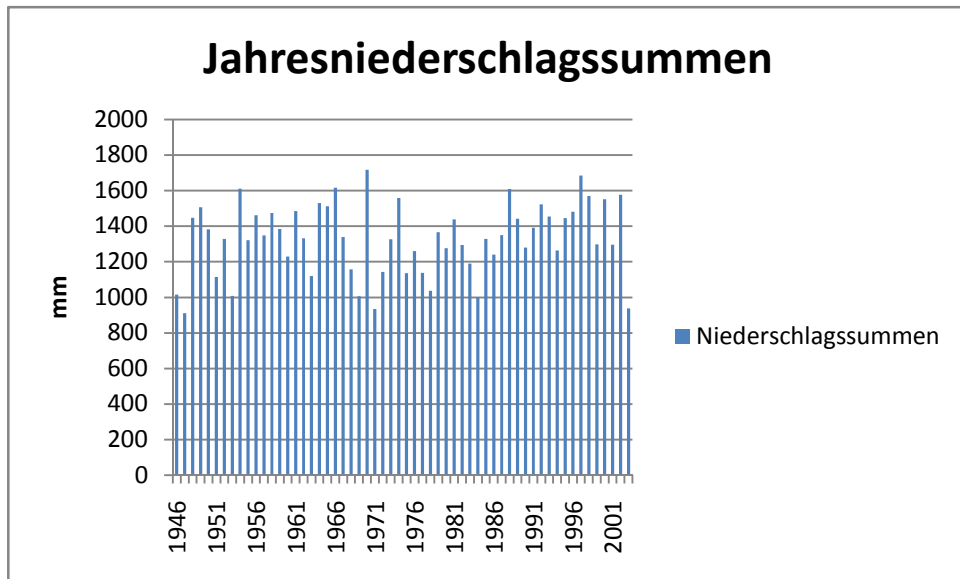
Auf den Seiten 69 bis 85 befinden sich die Diagramme der Jahresniederschlagssummen aller Messstationen sowie deren saisonale Entwicklungen.

Die Seiten 86 bis 92 zeigen die Entwicklungen der Abflüsse an den untersuchten Pegeln als Jahresmittelwerte und saisonale Mittelwerte graphisch dargestellt.

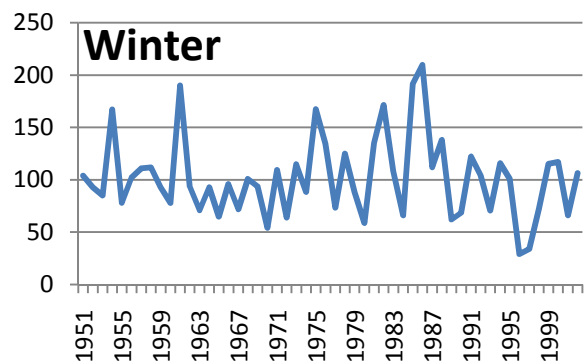
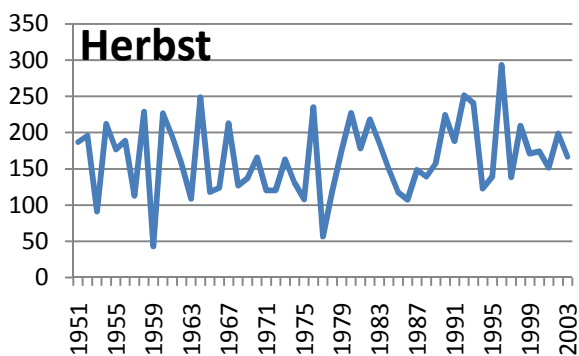
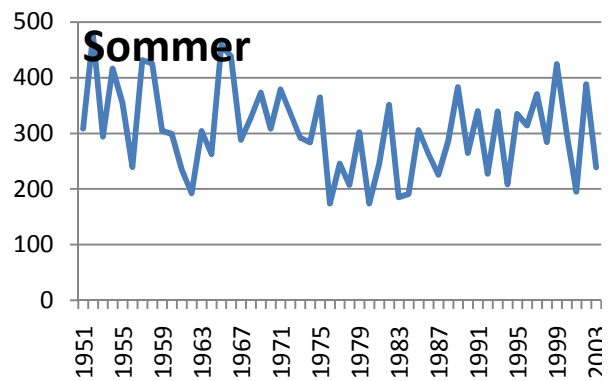
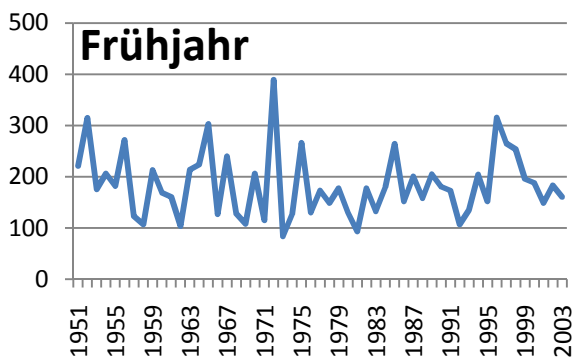
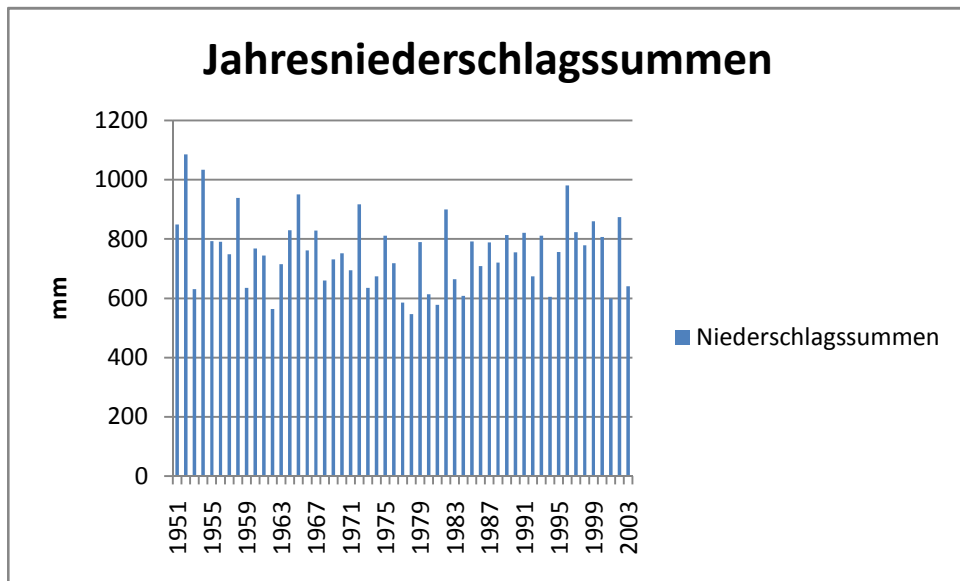
Auf den Seiten 93 bis 101 sind die Diagramme der Temperaturentwicklung jeweils im Jahres- sowie im saisonalen Durchschnitt dargestellt.

Zuletzt, auf den Seiten 102 und 103, sind die Übersichtskarten der Stationen sowie der Höhenlage nochmals in einem größeren Format abgebildet.

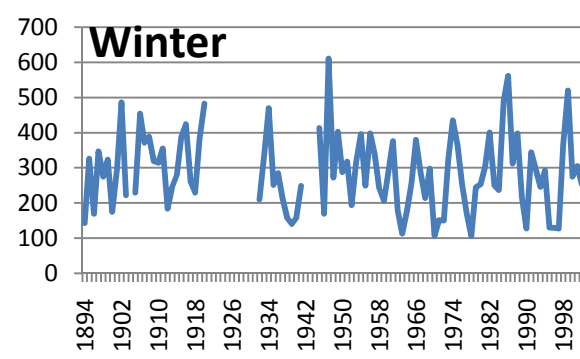
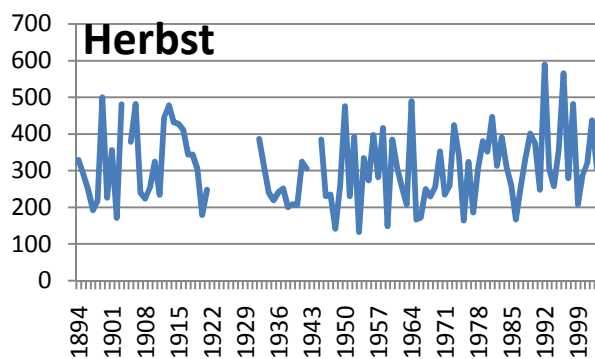
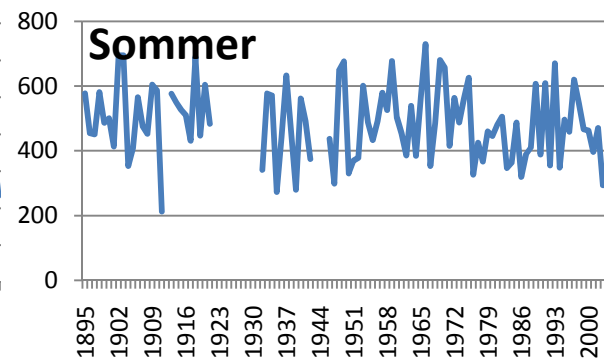
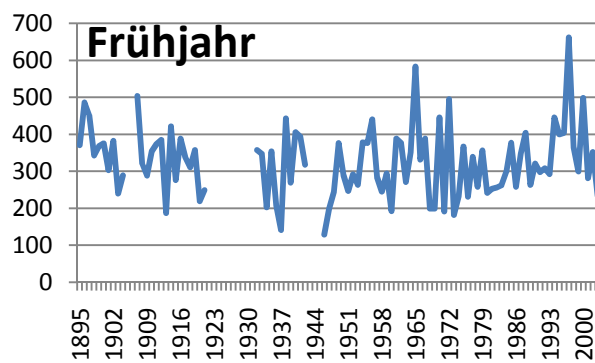
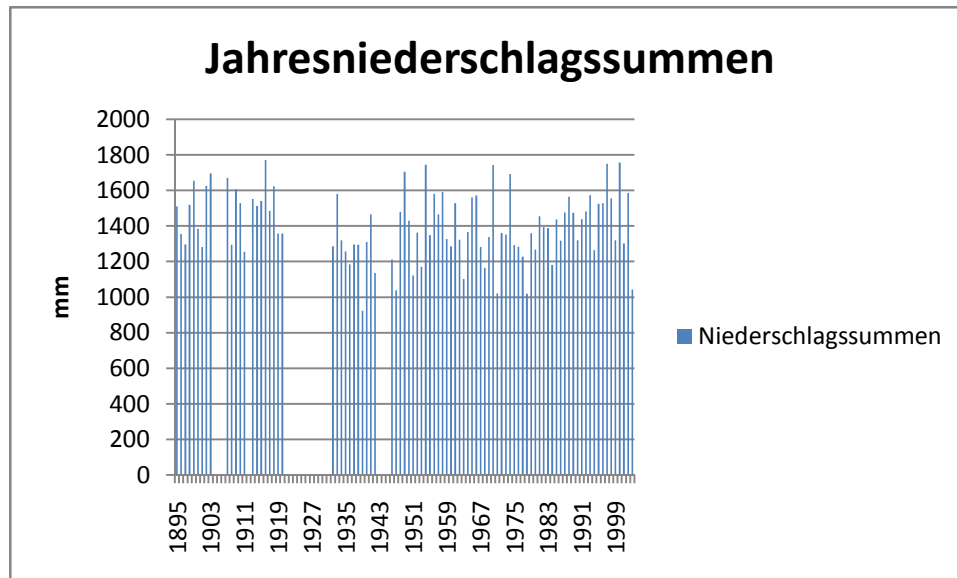
BRUNNGRABEN



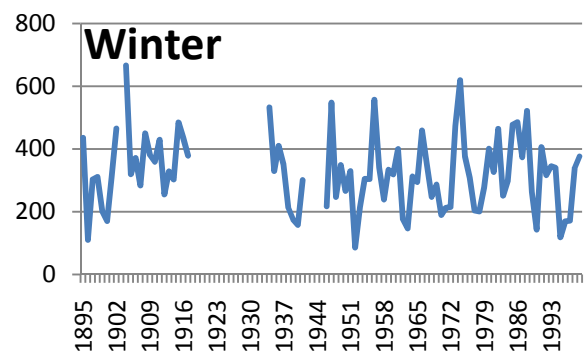
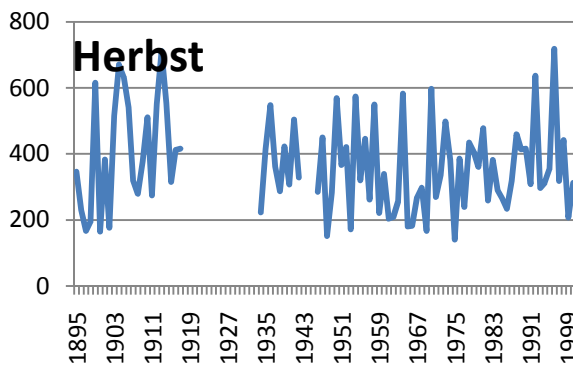
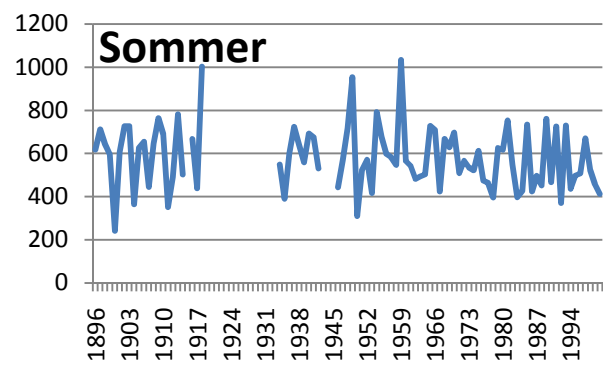
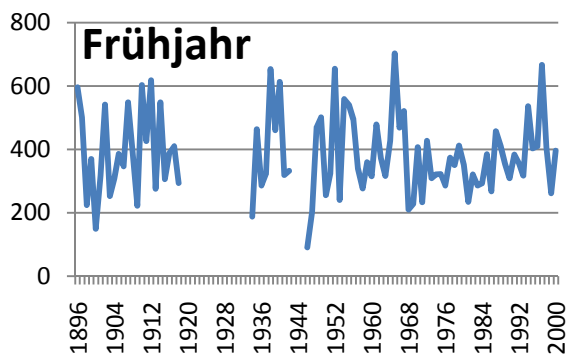
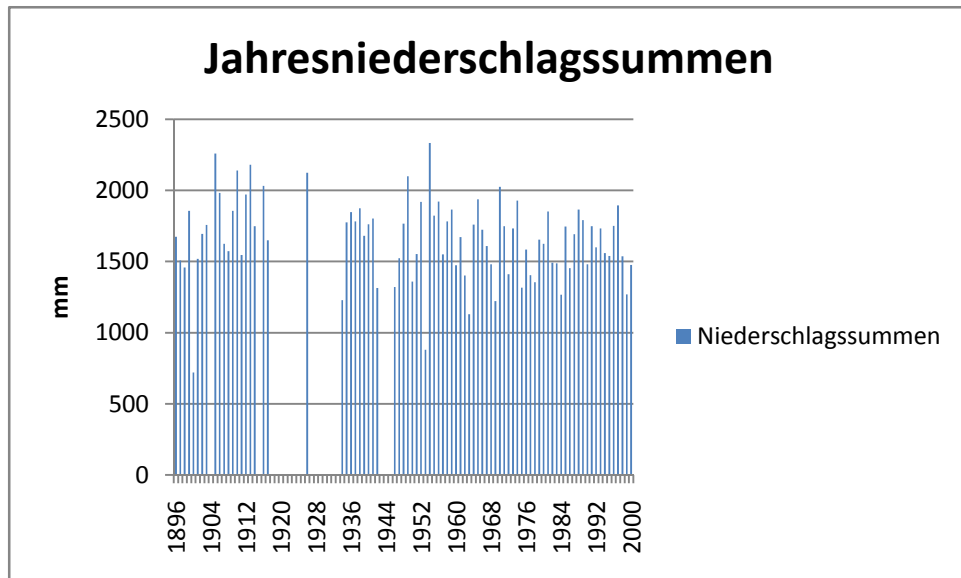
GLOGGNITZ



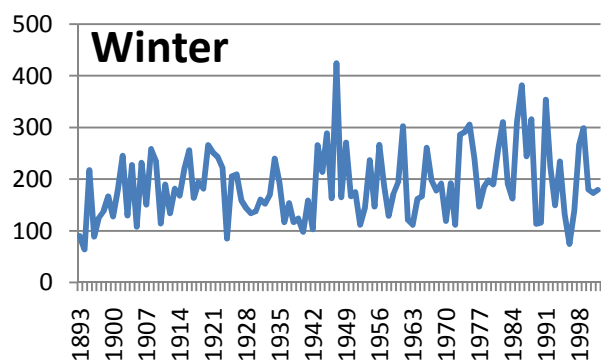
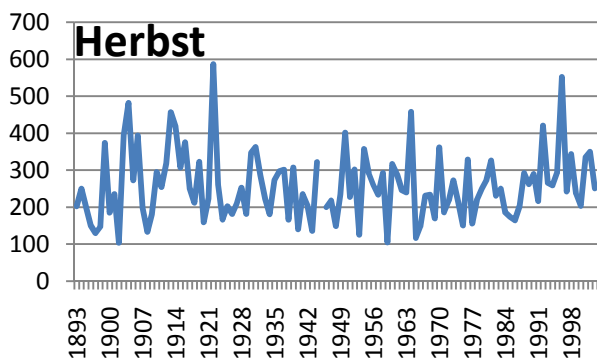
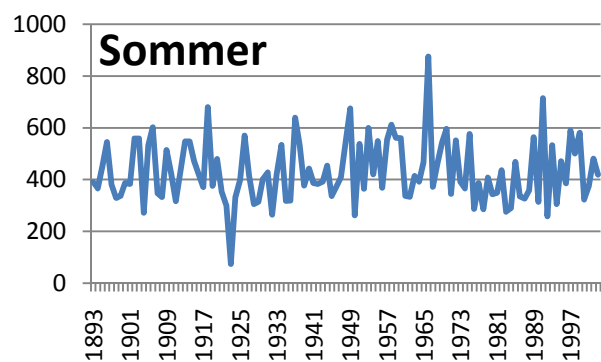
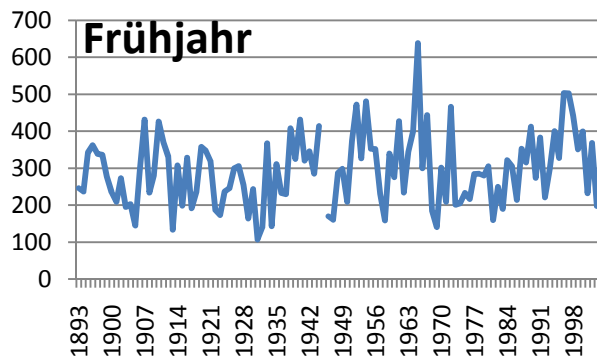
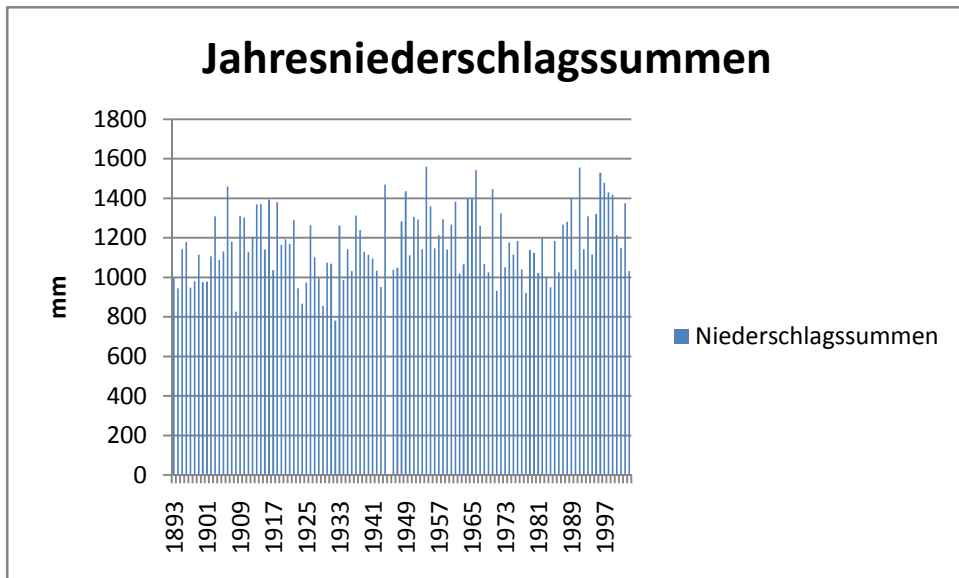
GOLLRAD



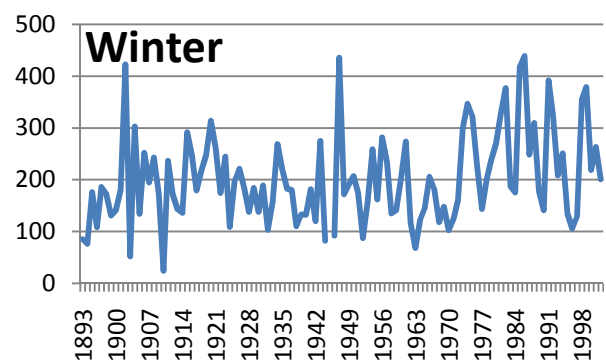
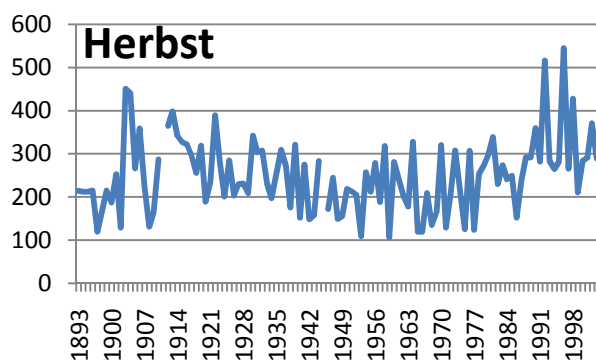
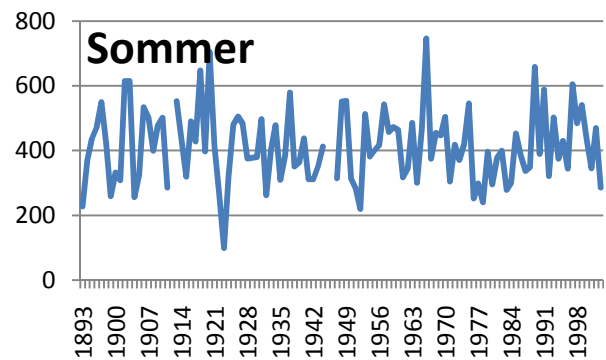
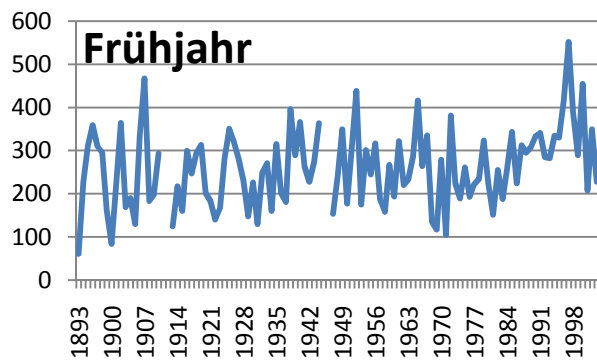
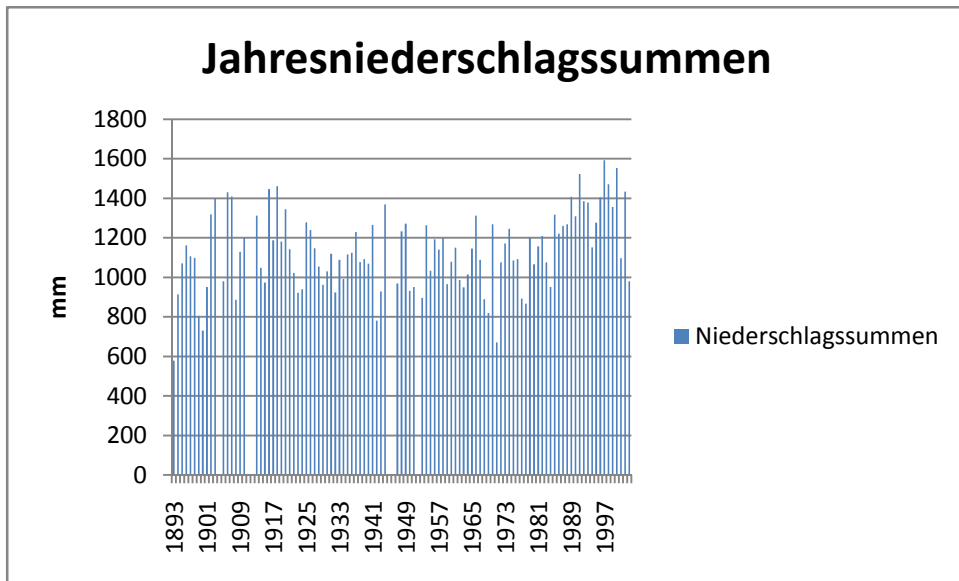
HIEFLAU



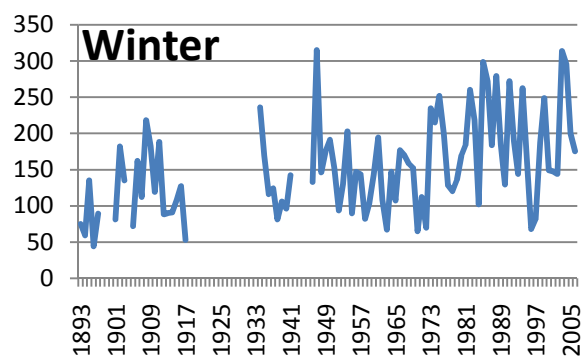
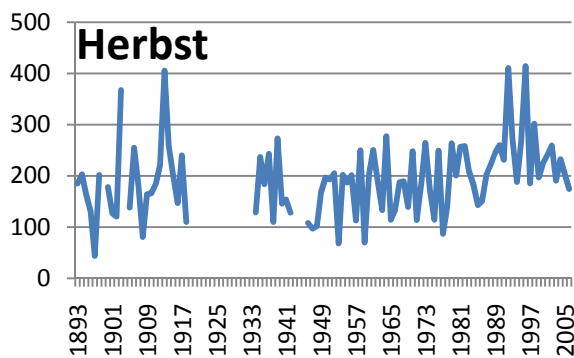
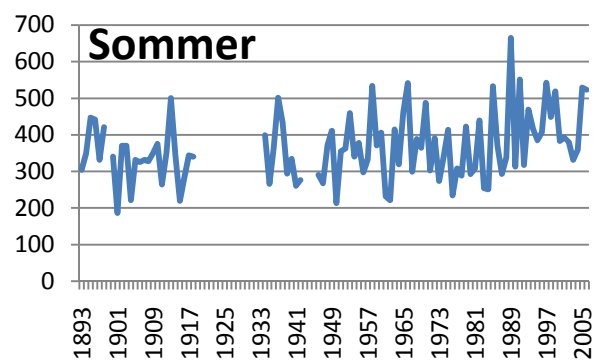
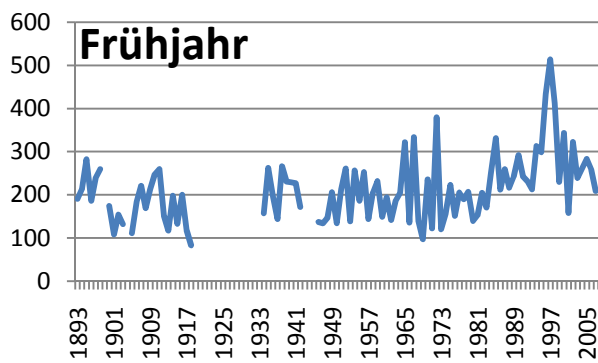
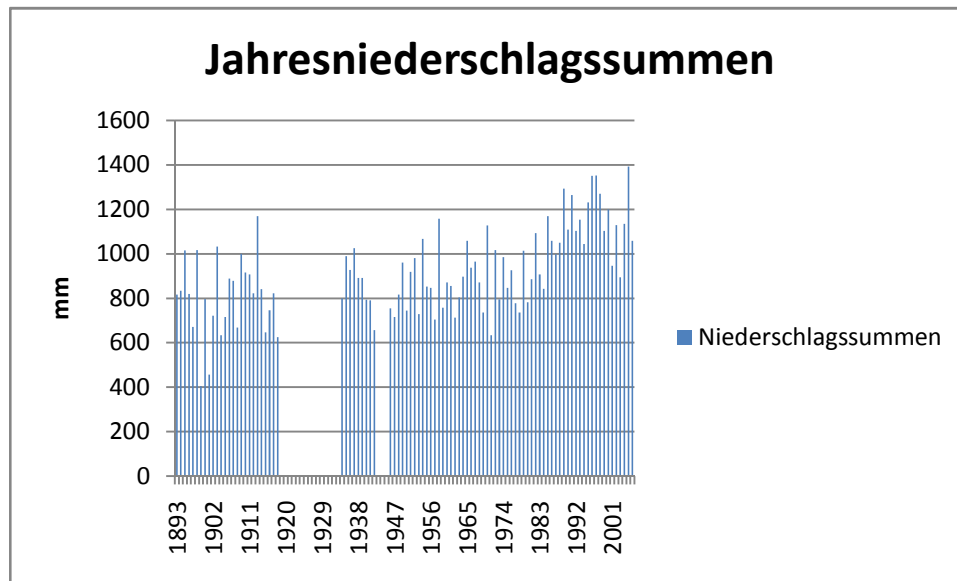
KAISERBRUNN



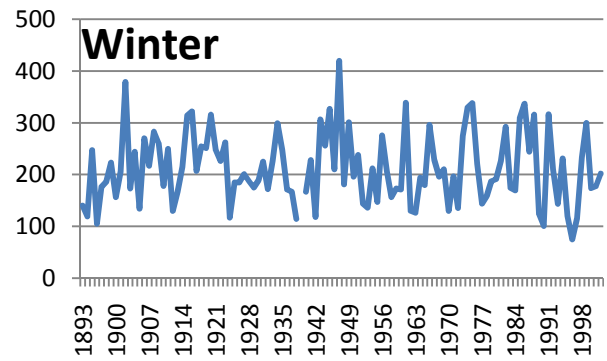
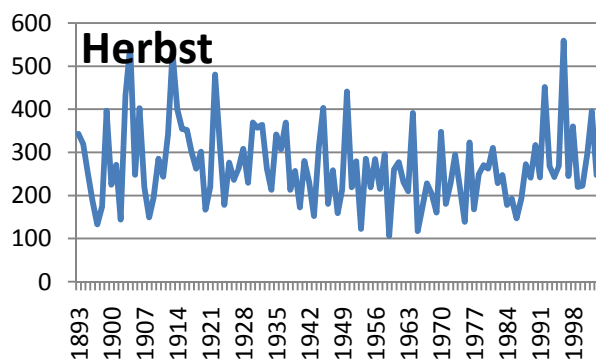
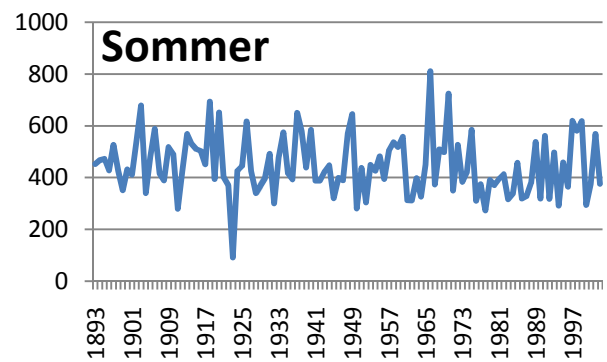
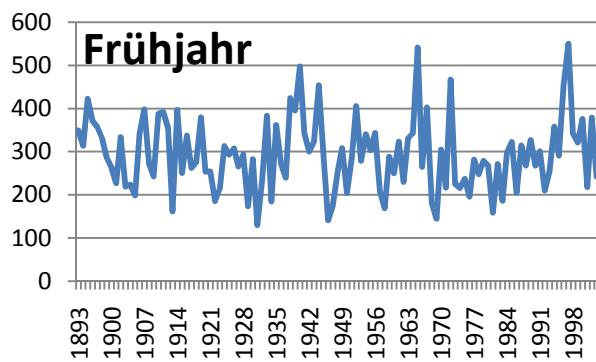
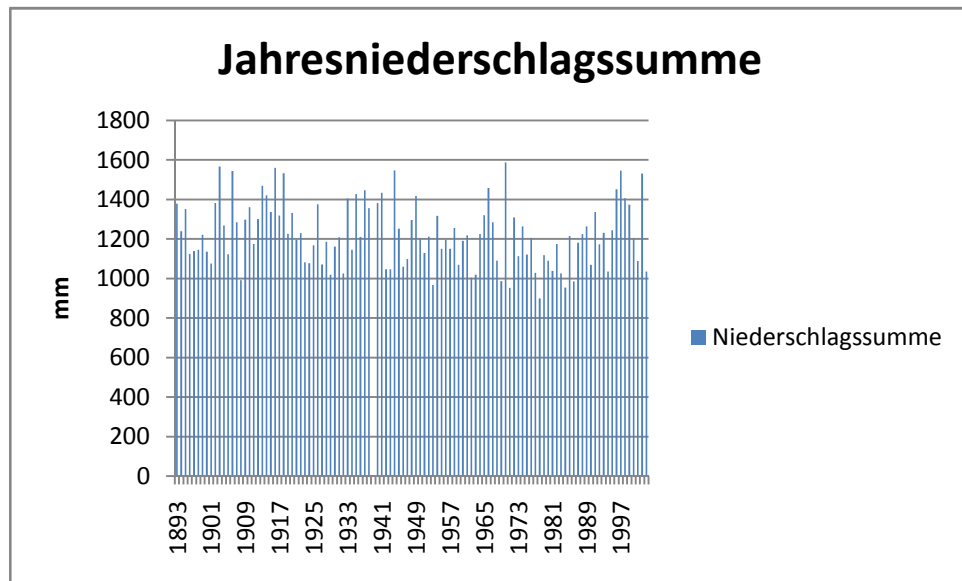
MÜRZSTEG



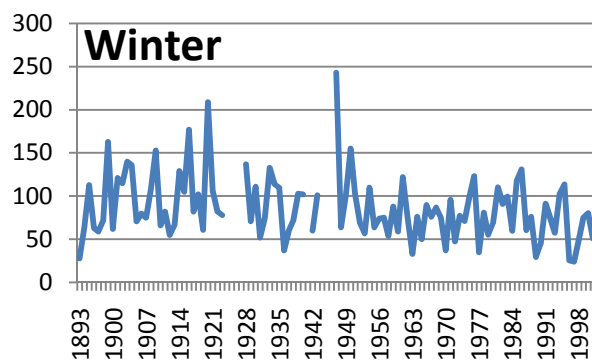
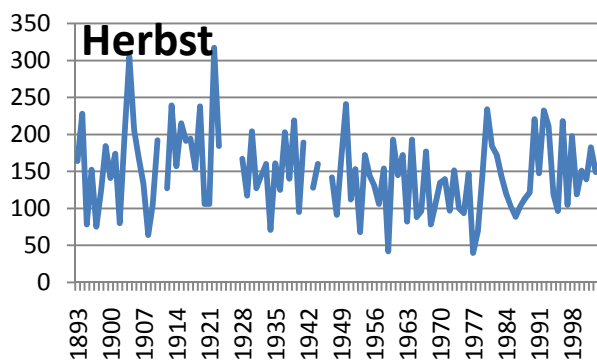
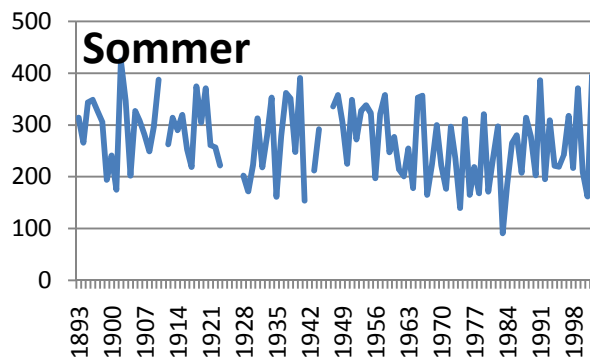
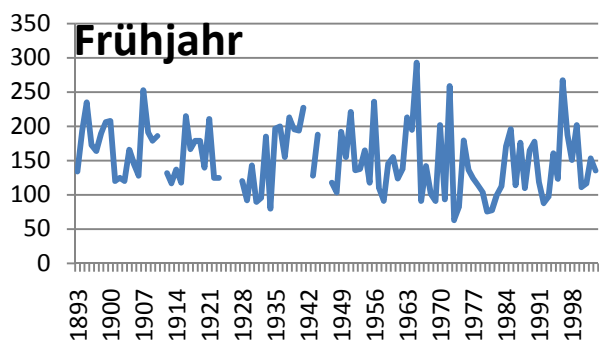
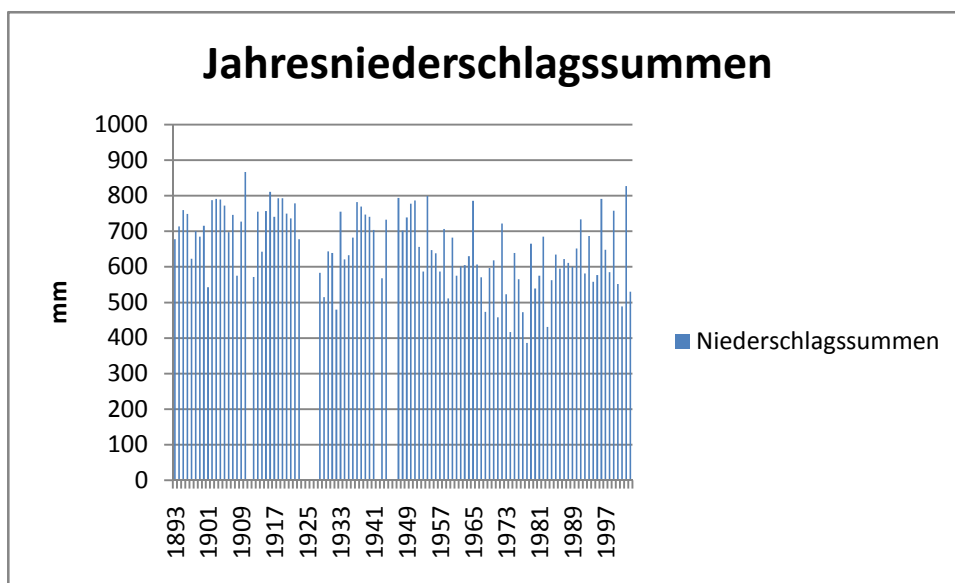
MÜRZZUSCHLAG



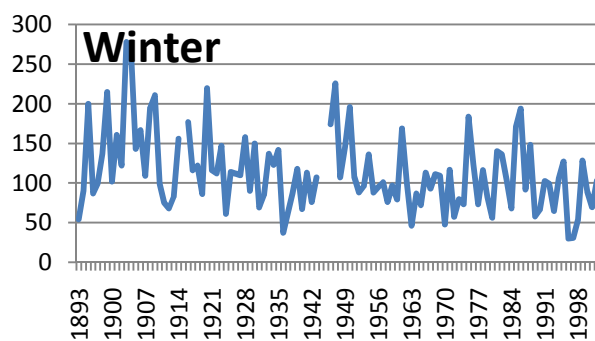
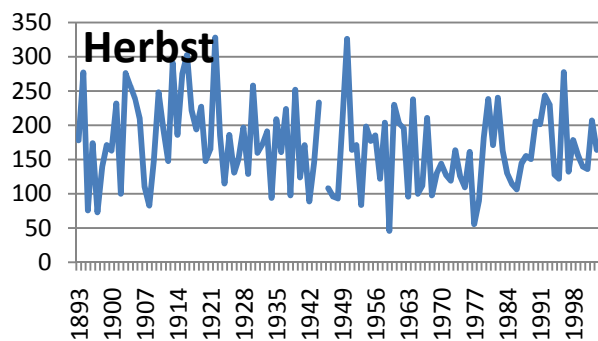
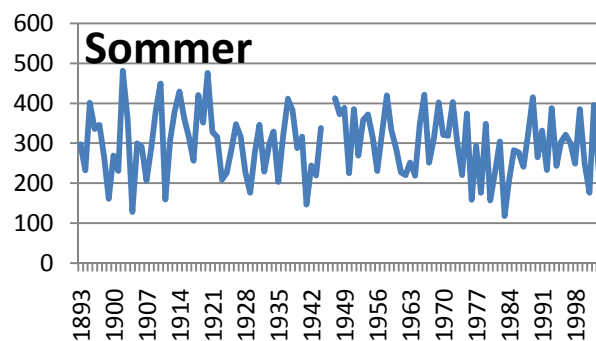
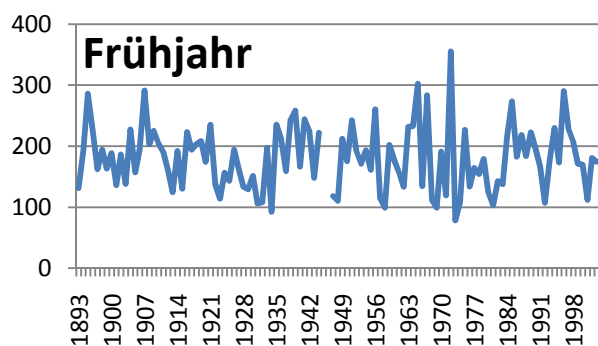
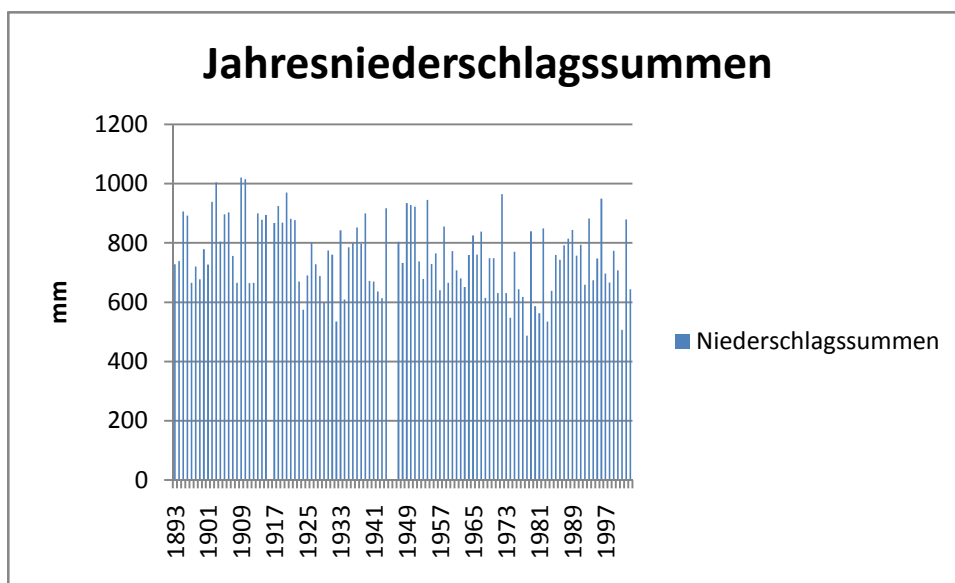
NABWALD



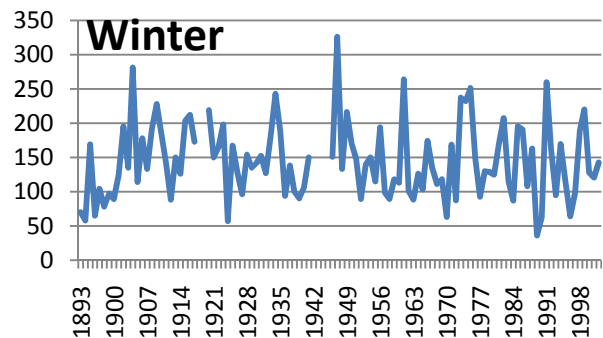
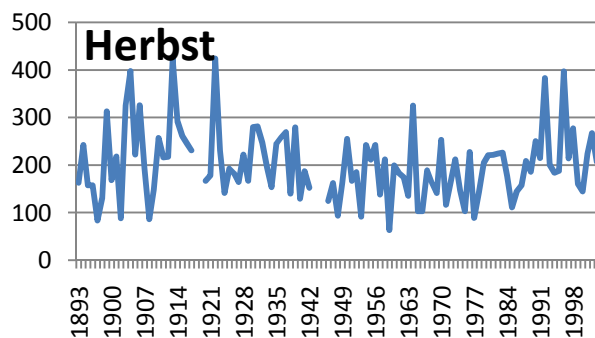
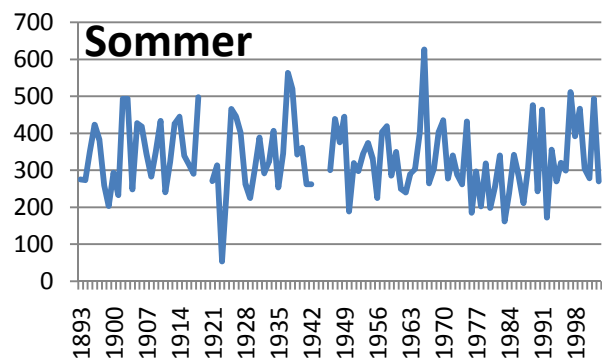
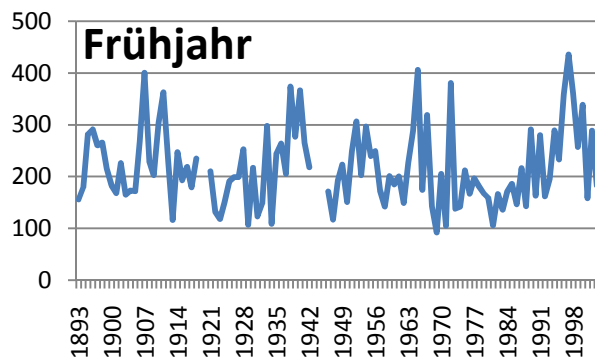
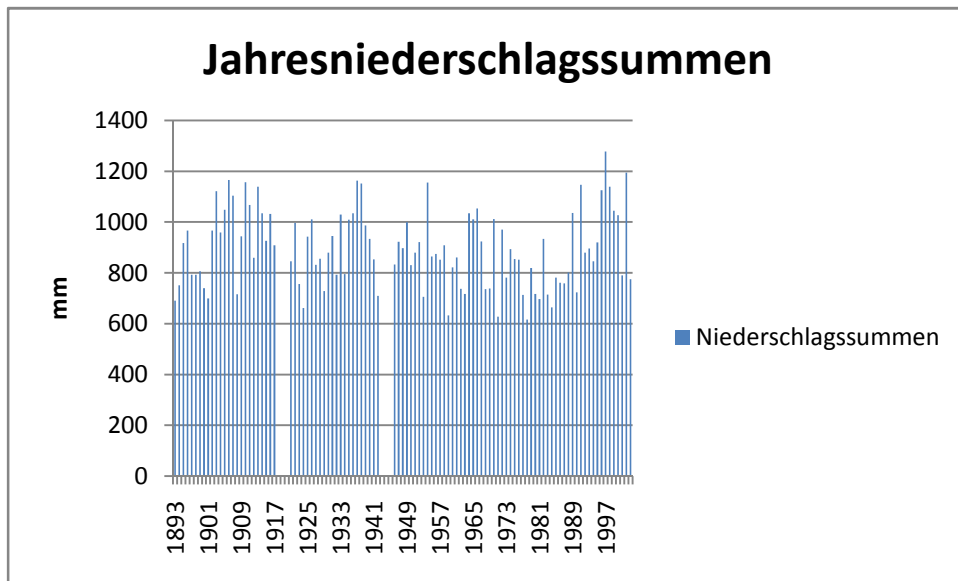
NEUNKIRCHEN



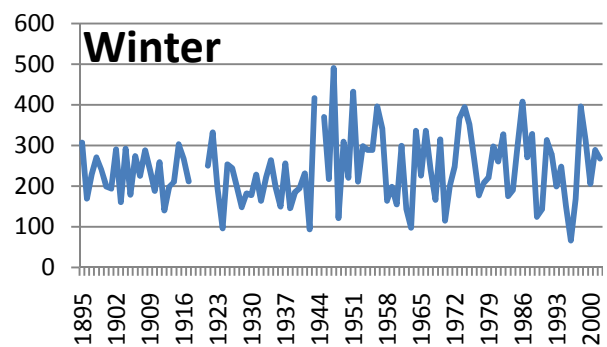
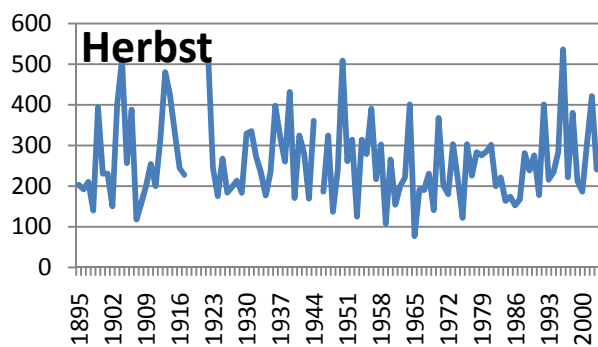
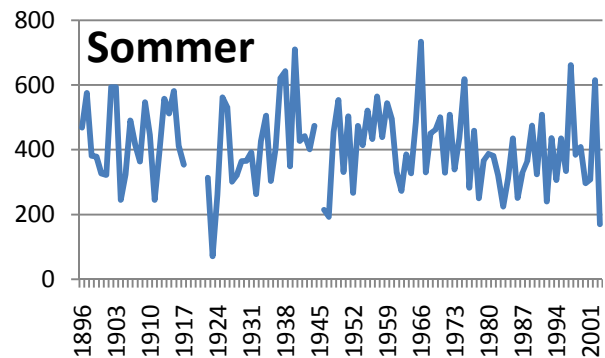
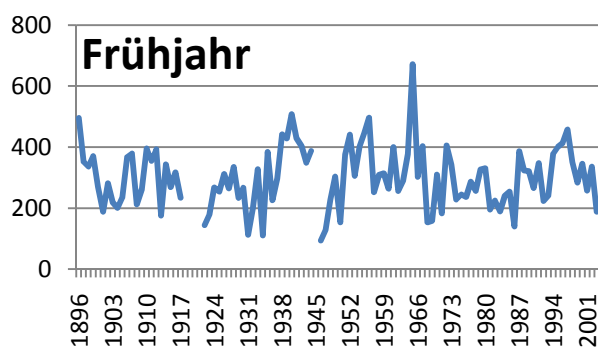
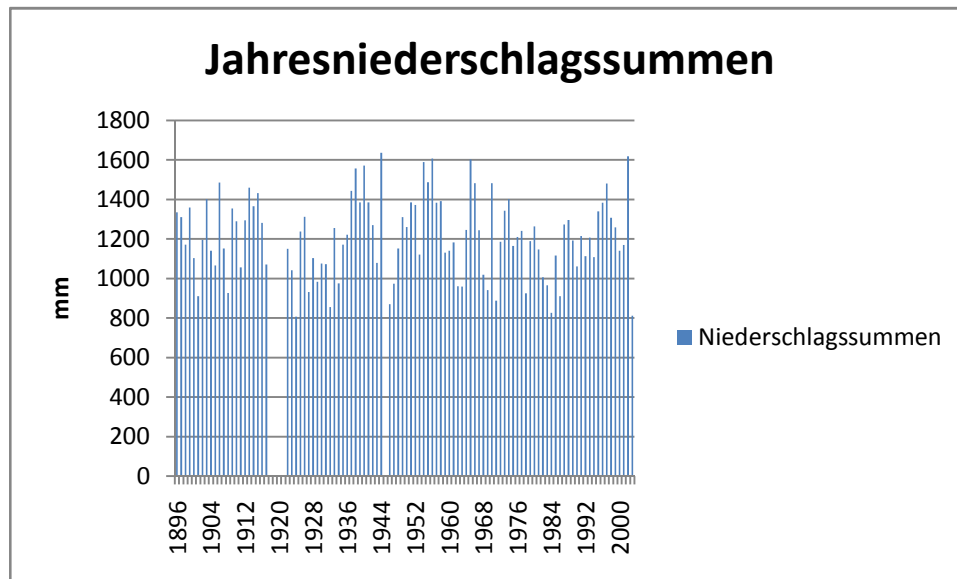
POTTSCHACH



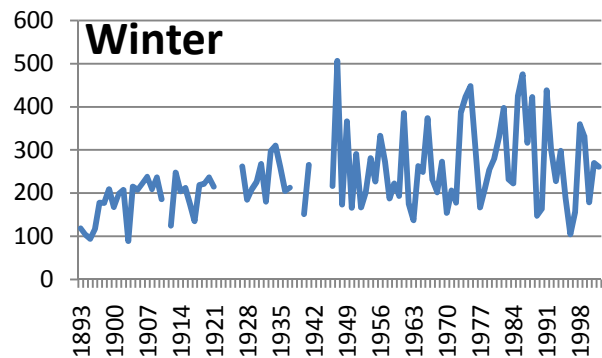
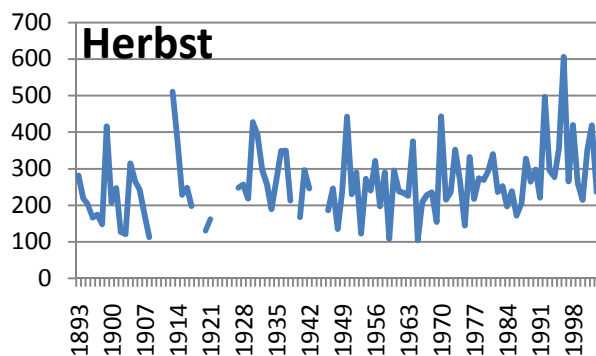
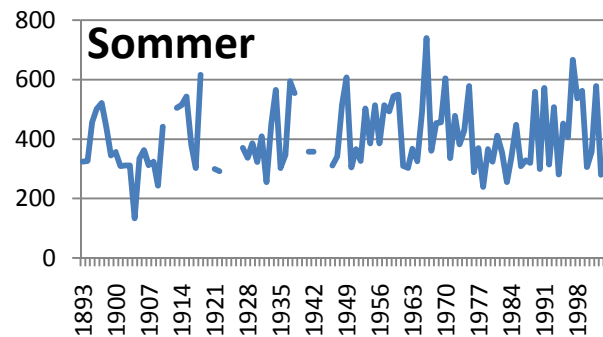
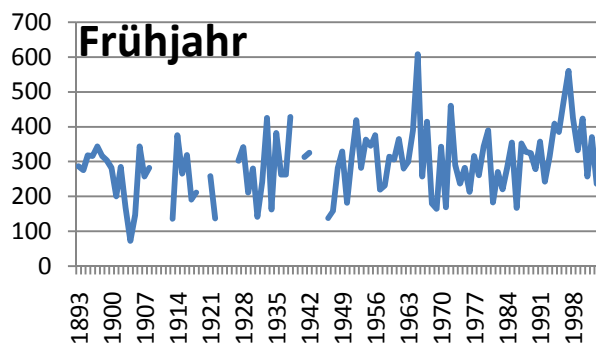
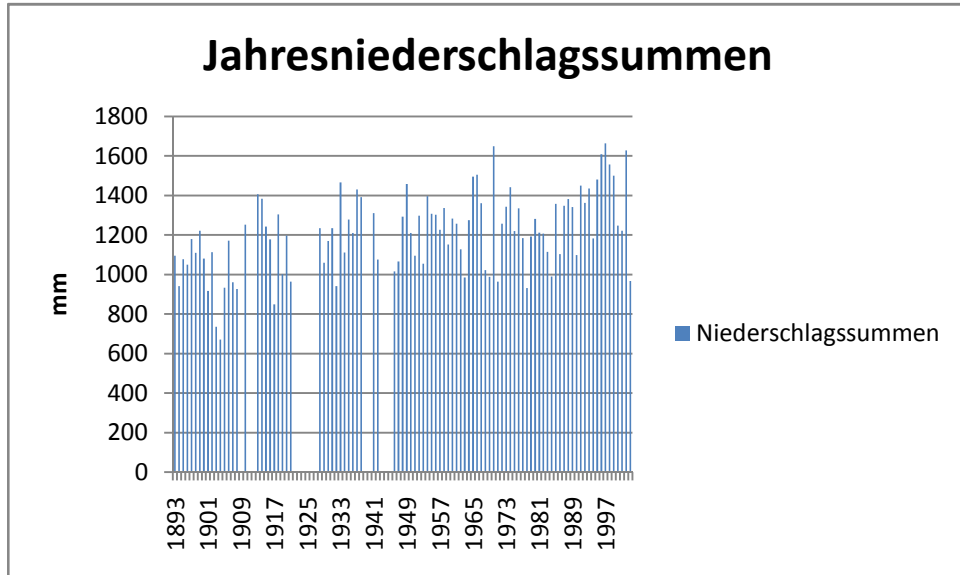
REICHENAU AN DER RAX



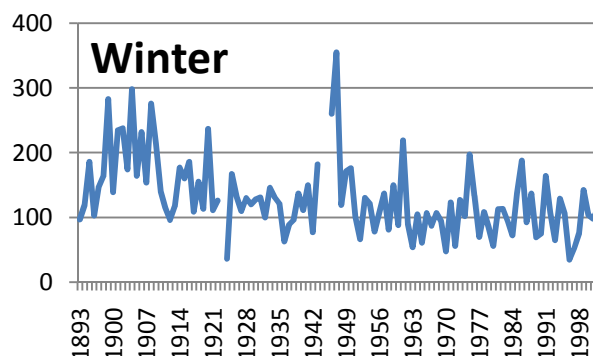
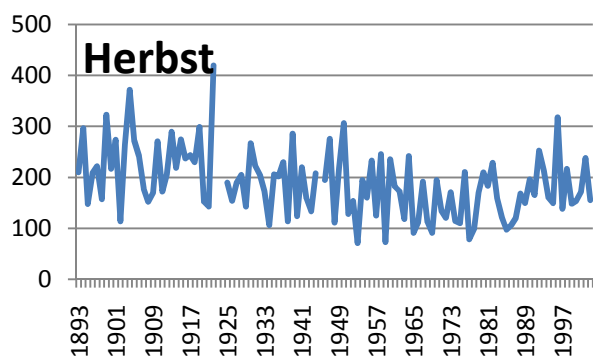
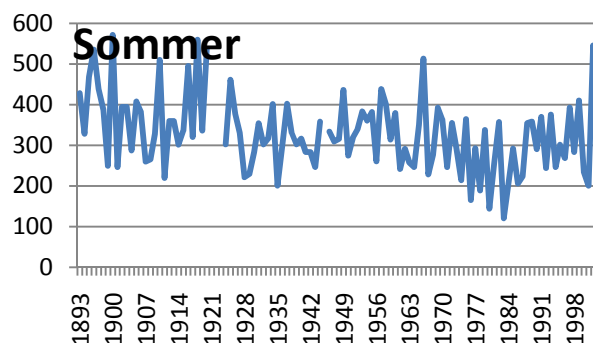
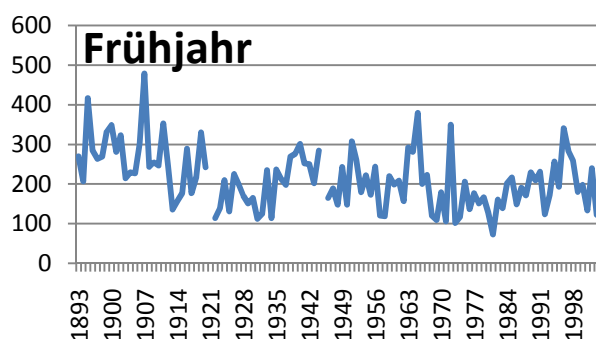
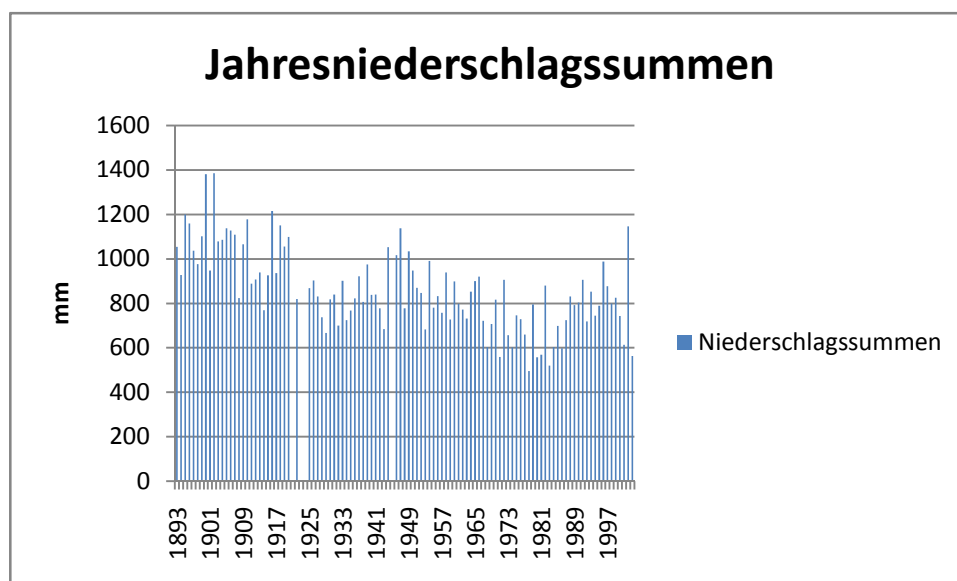
ROHR IM GEBIRGE



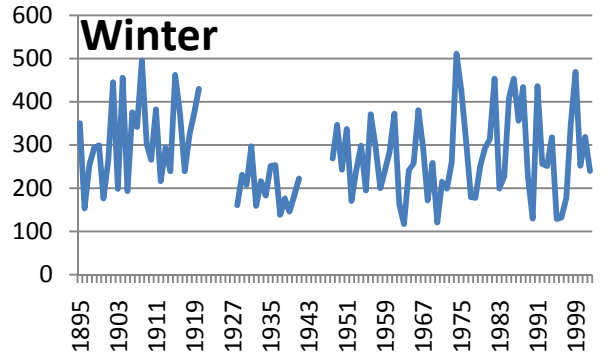
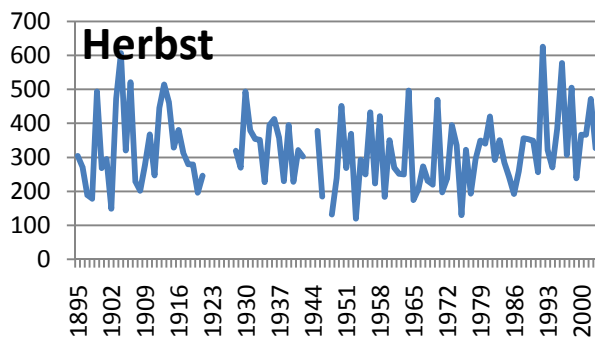
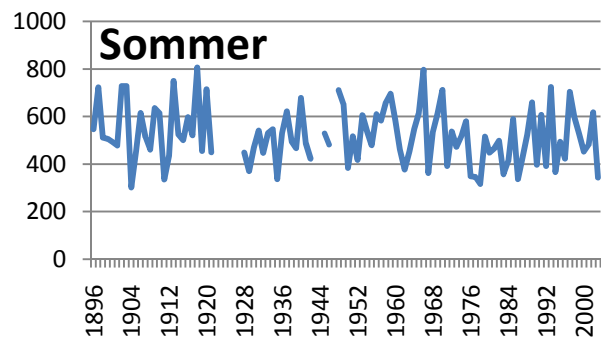
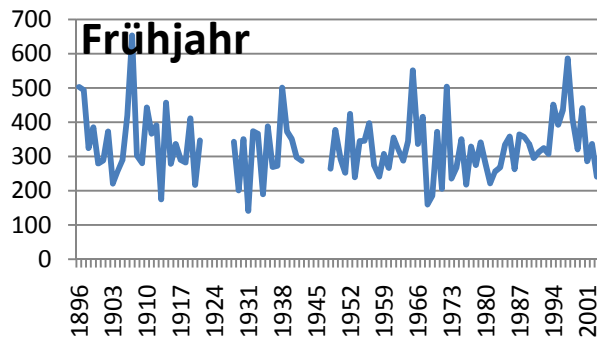
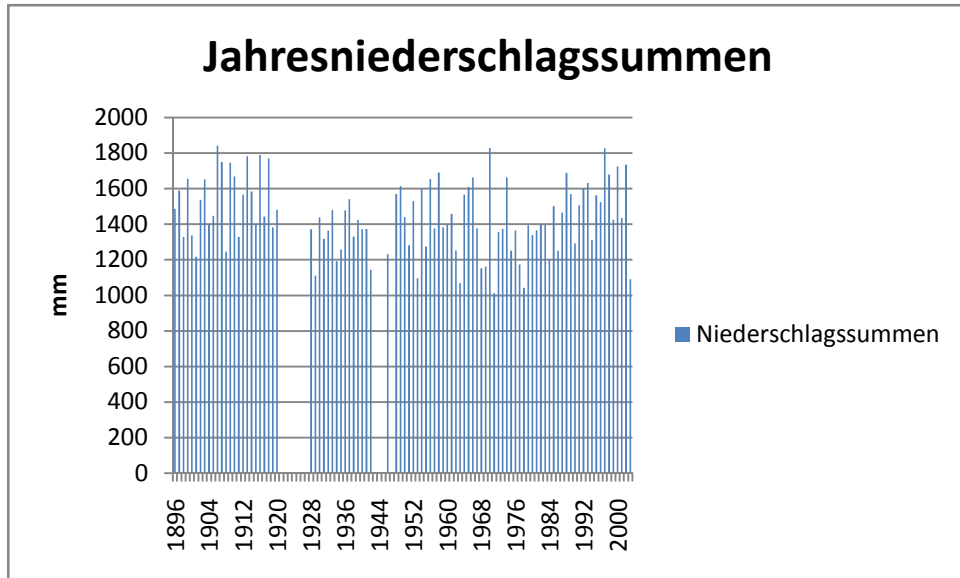
SCHWARZAU IM GEBIRGE



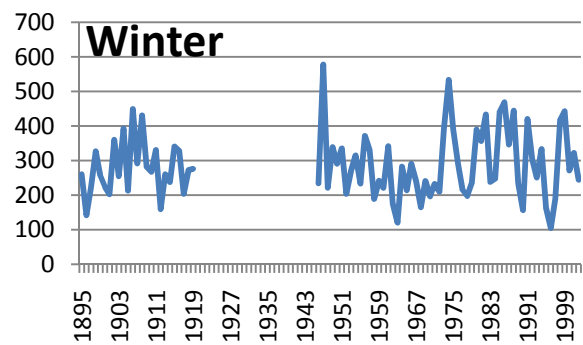
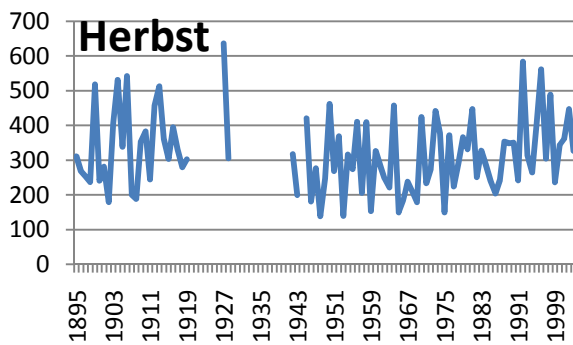
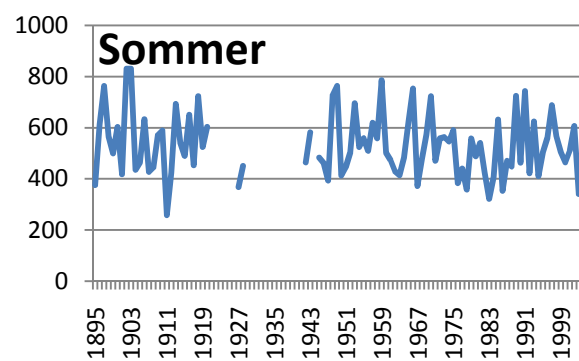
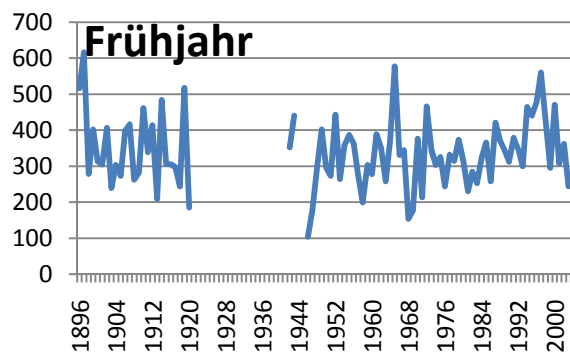
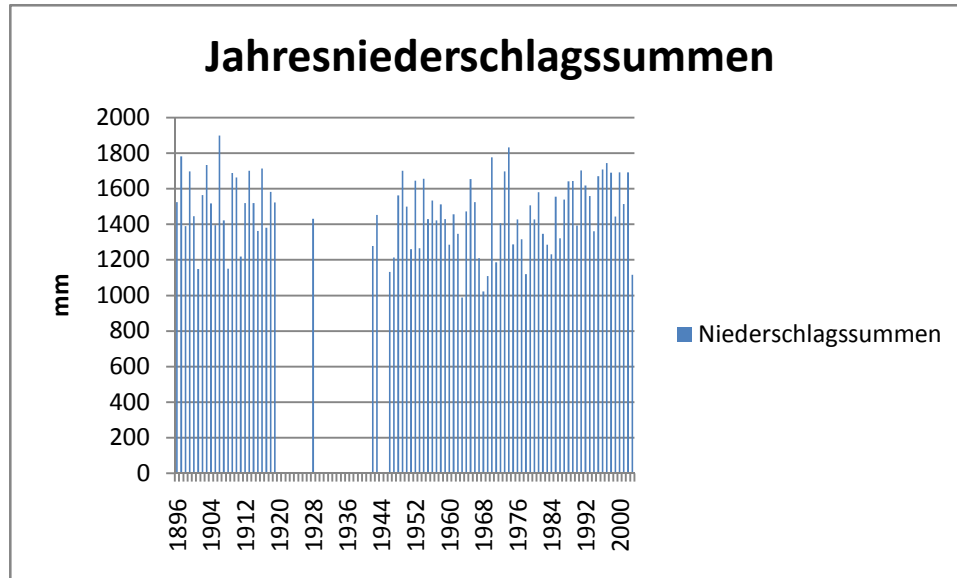
STIXENSTEIN



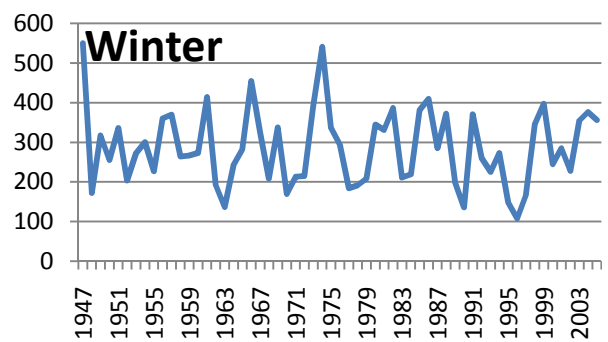
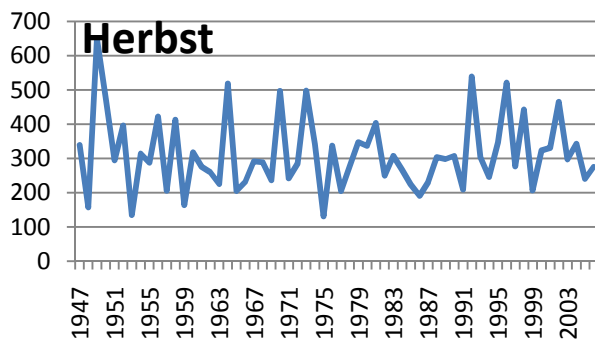
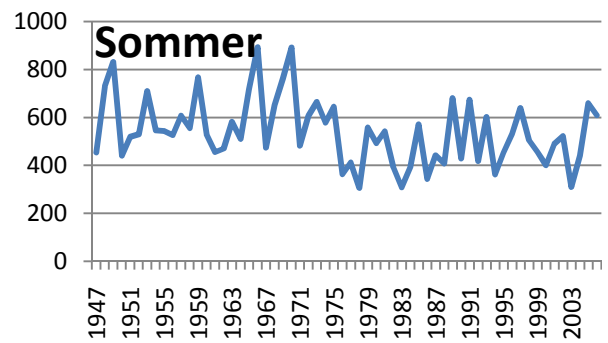
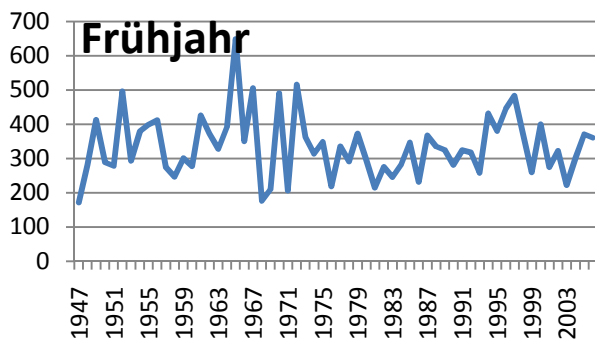
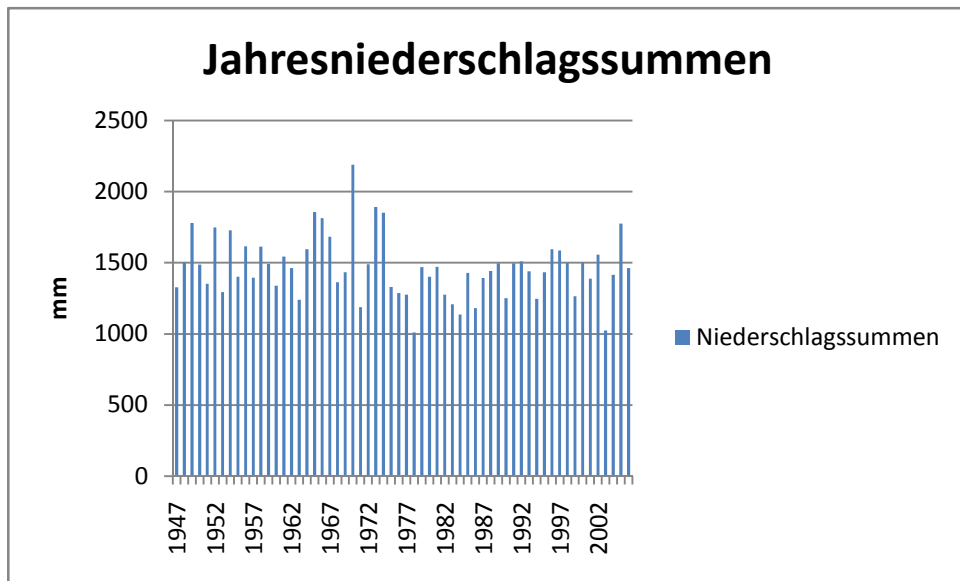
WEICHSELBODEN



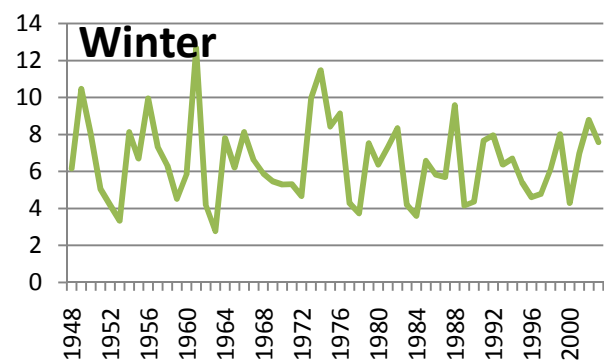
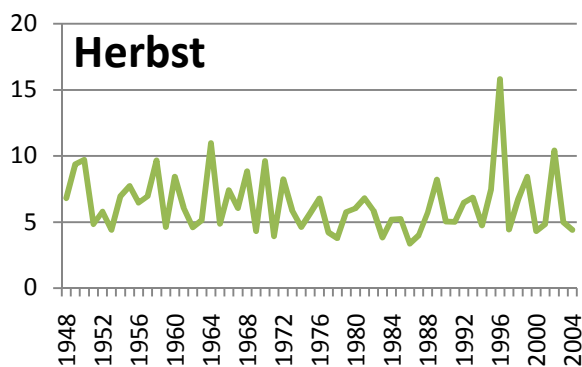
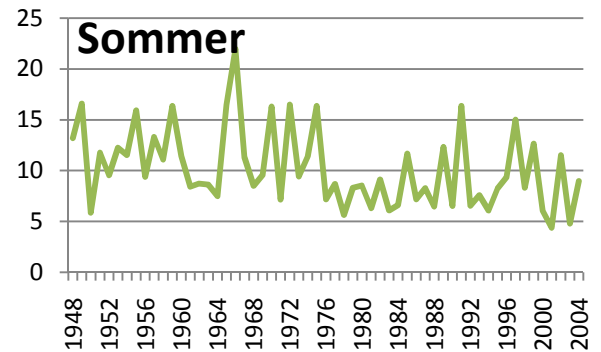
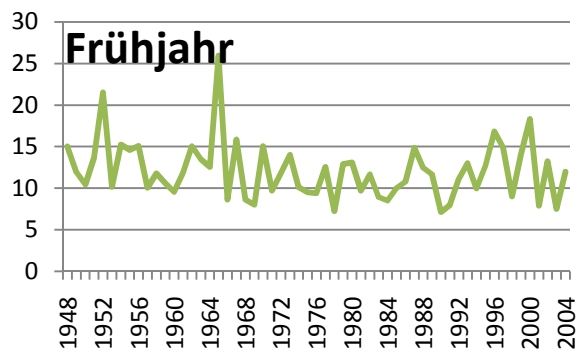
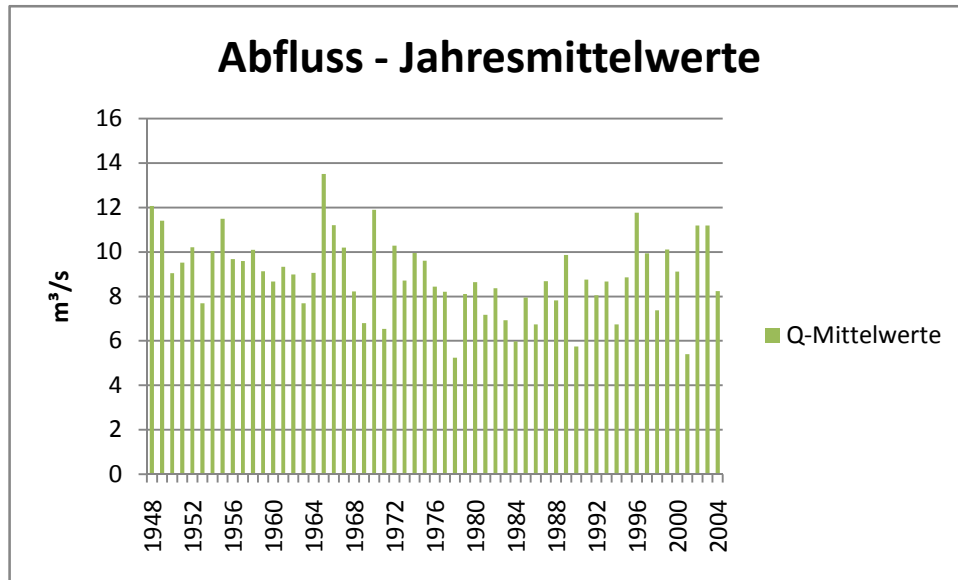
WILDALPEN



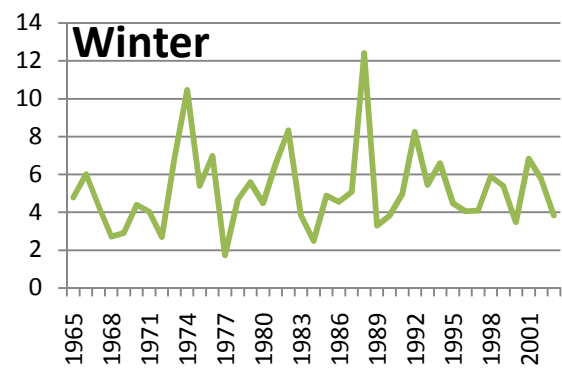
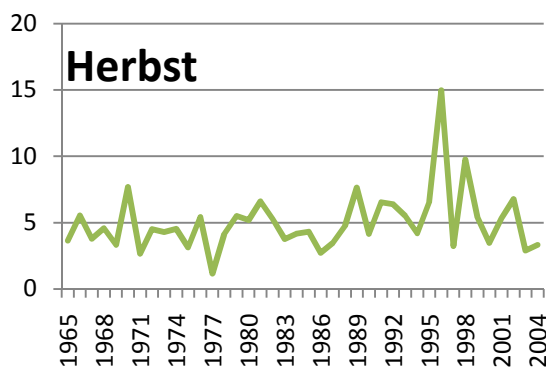
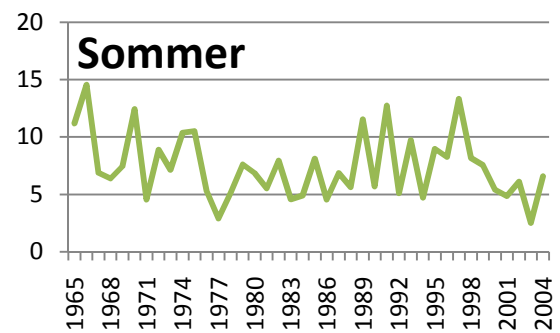
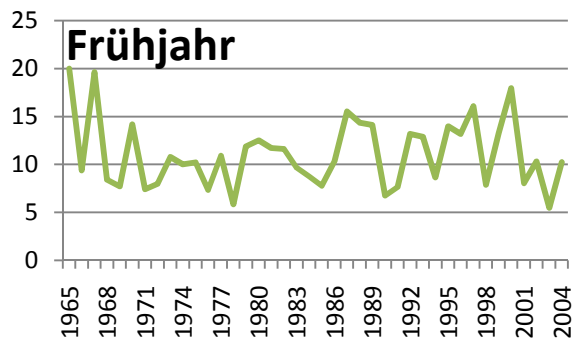
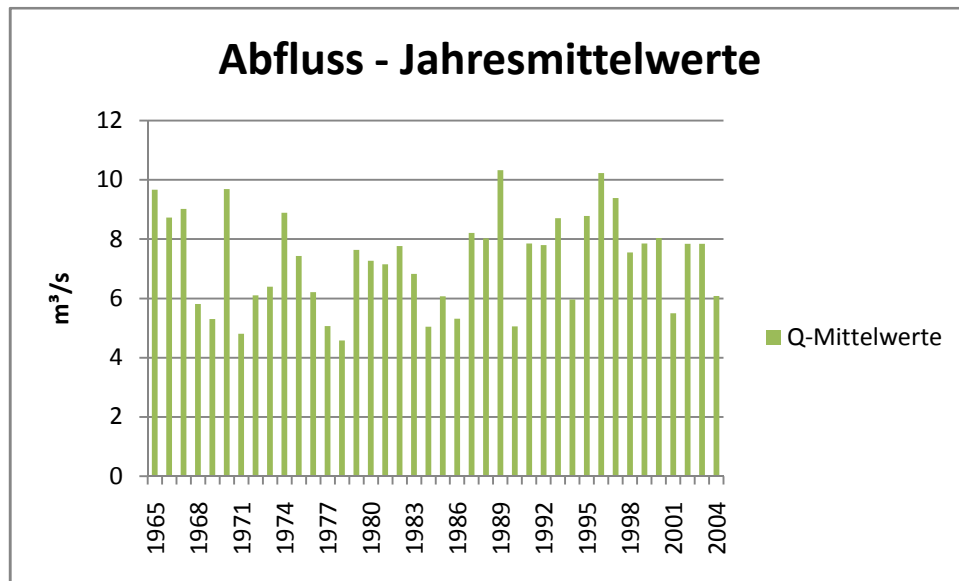
WINTERHÖHE



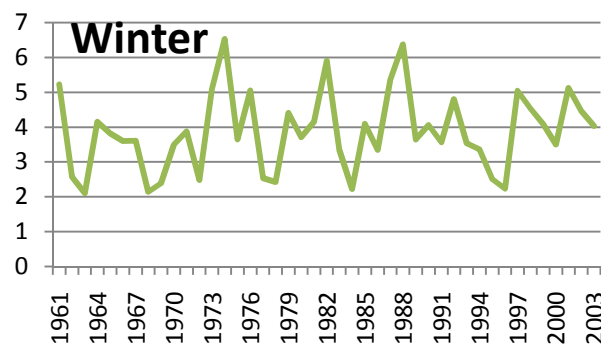
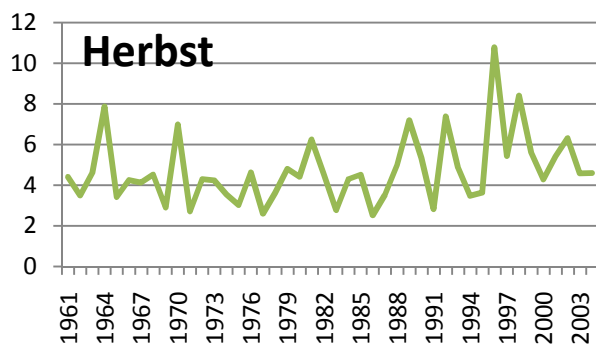
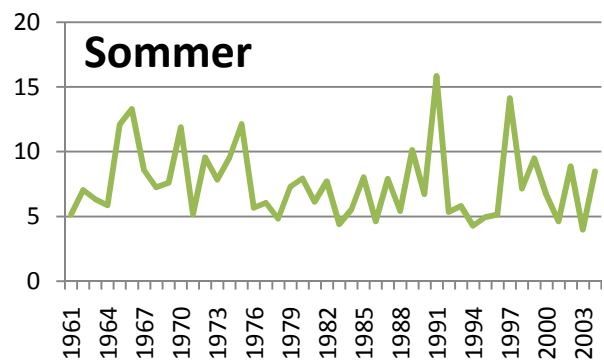
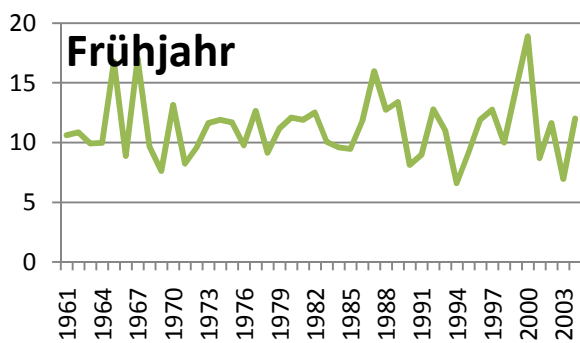
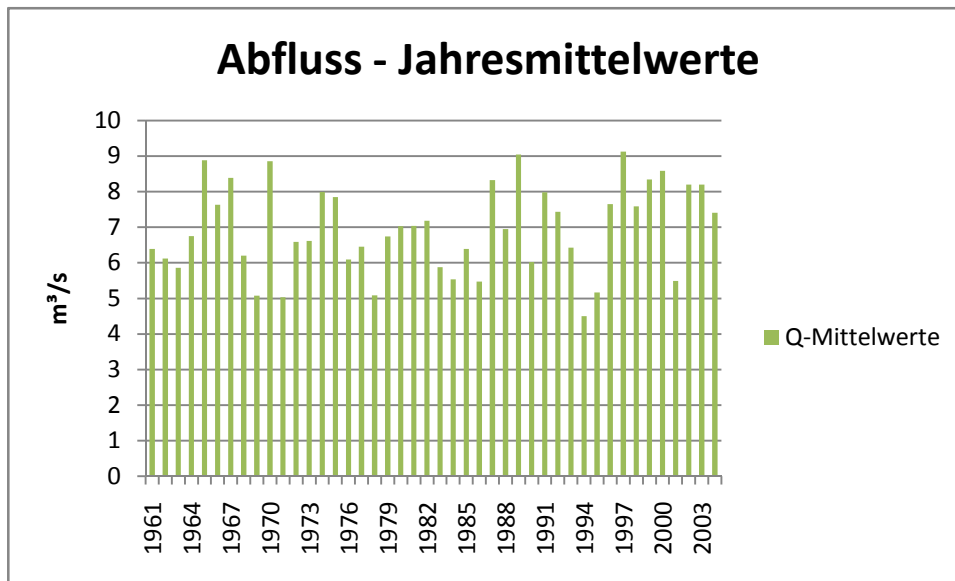
GLOGGNITZ



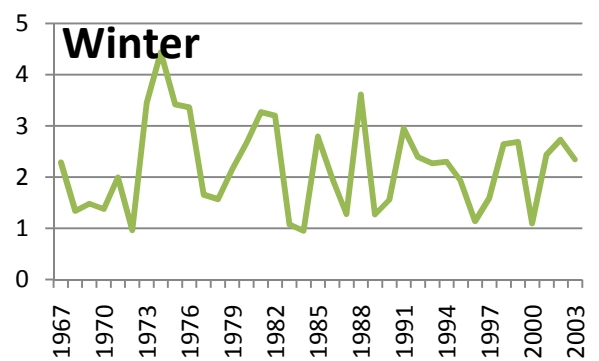
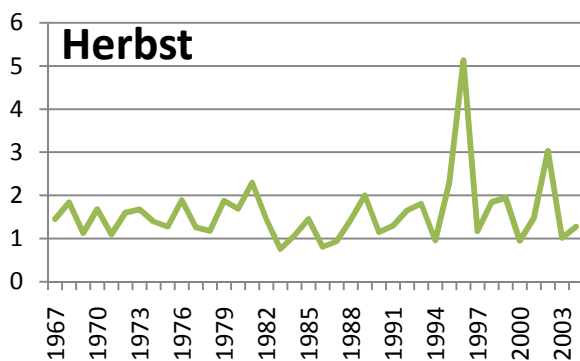
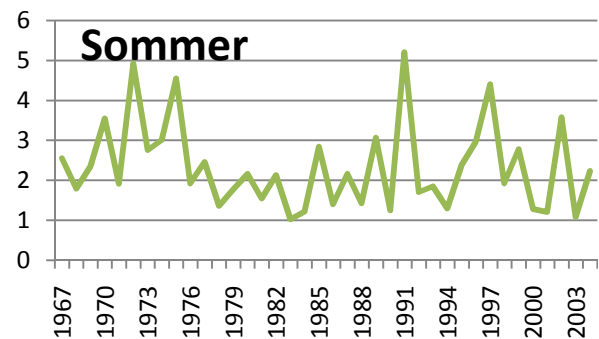
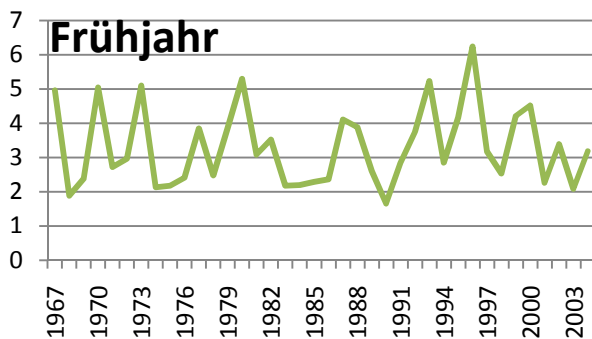
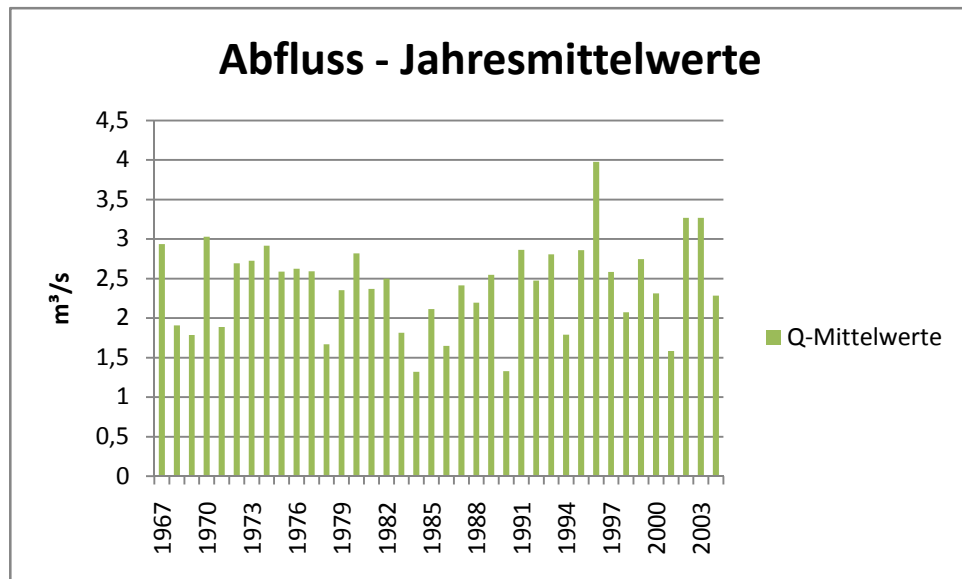
GÜßWERK



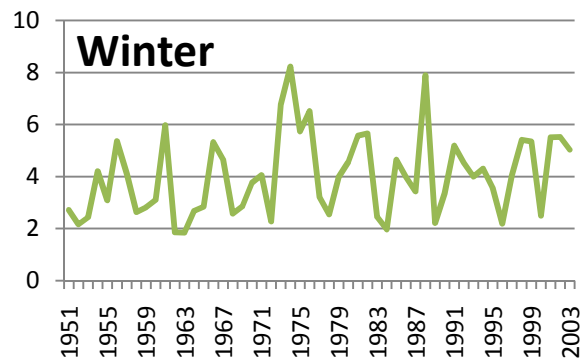
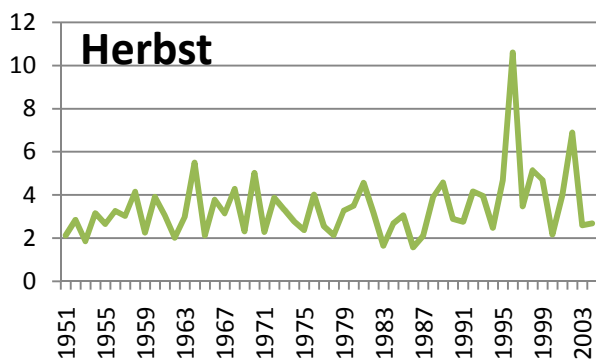
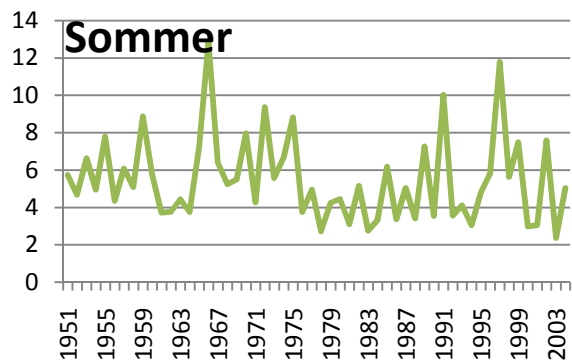
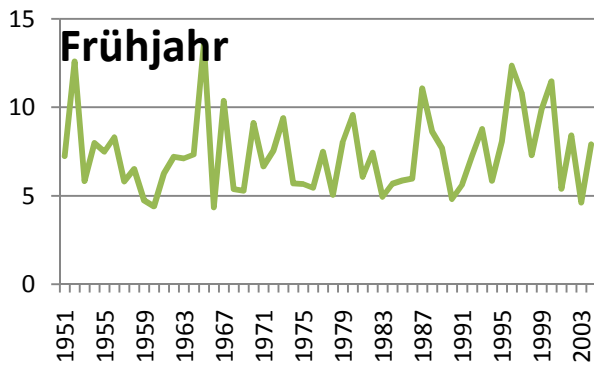
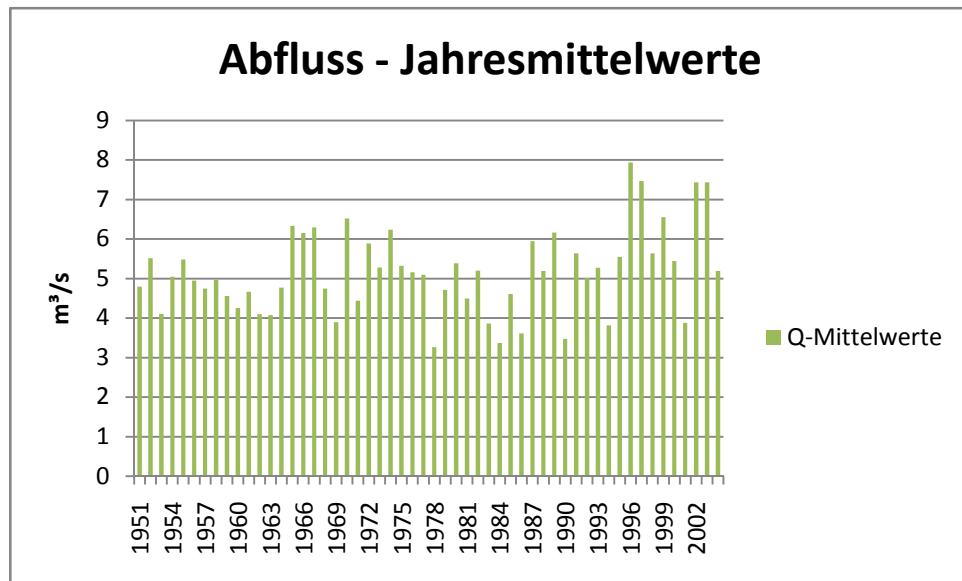
NEUBERG AN DER MÜRZ



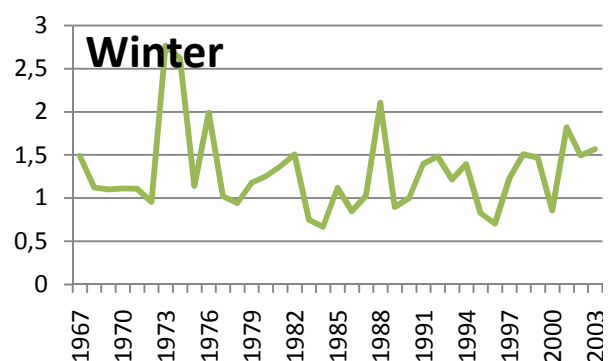
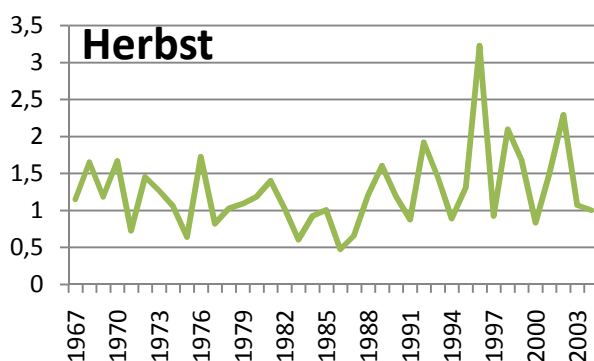
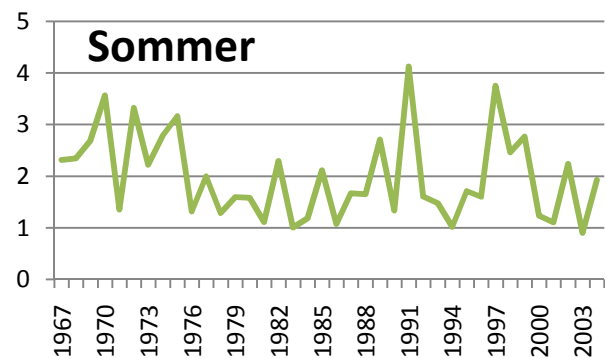
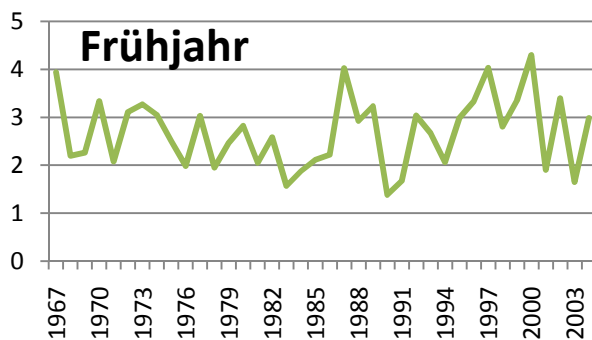
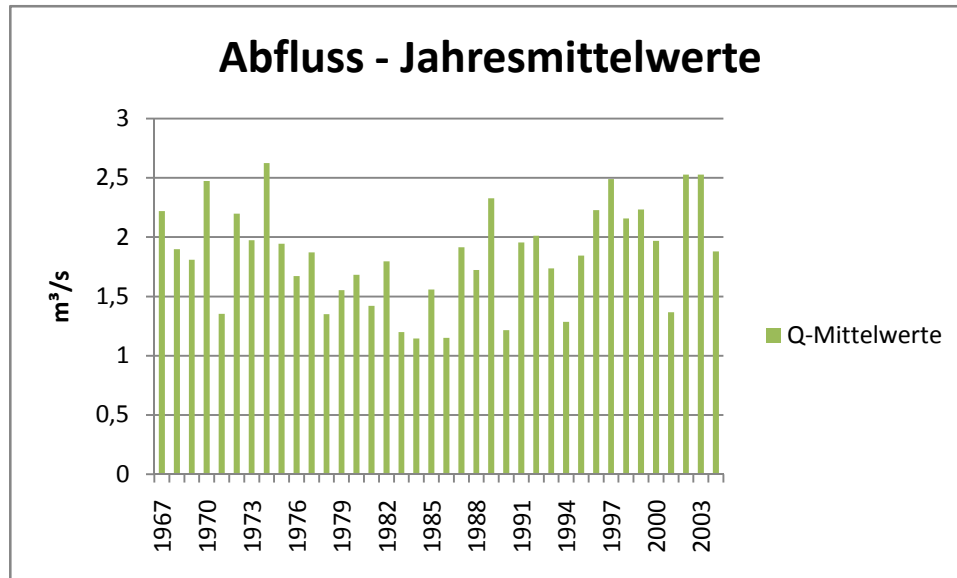
SCHWARZAU IM GEBIRGE



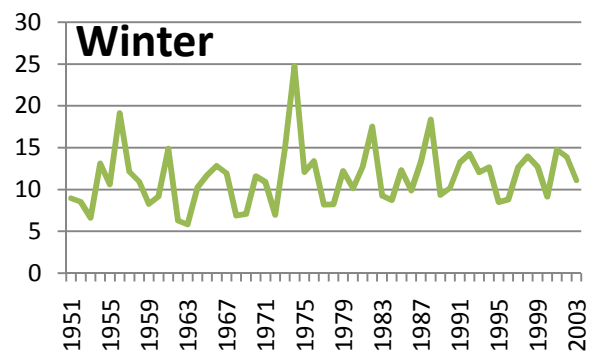
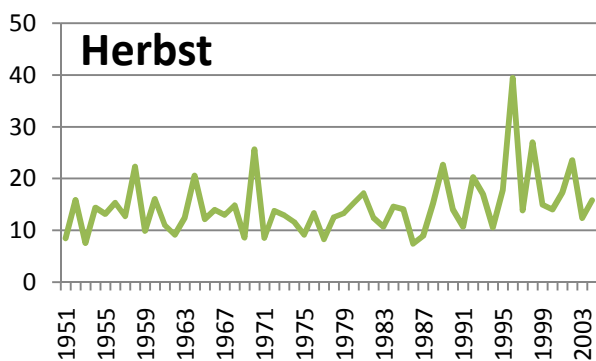
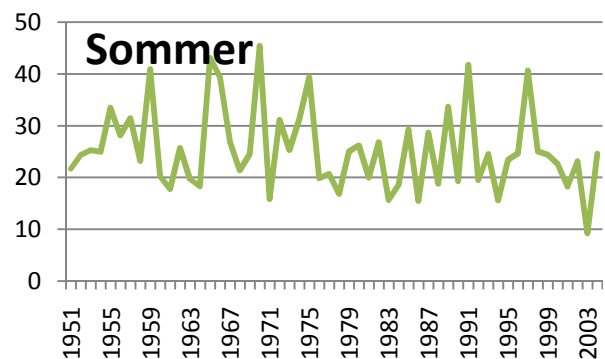
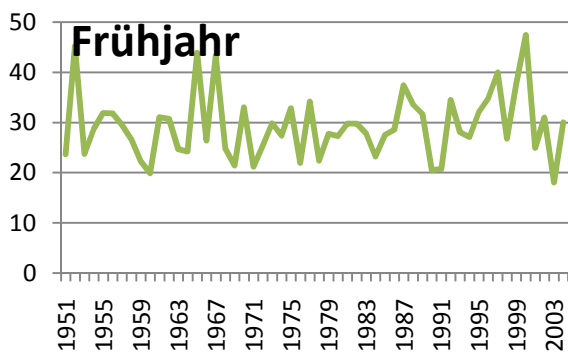
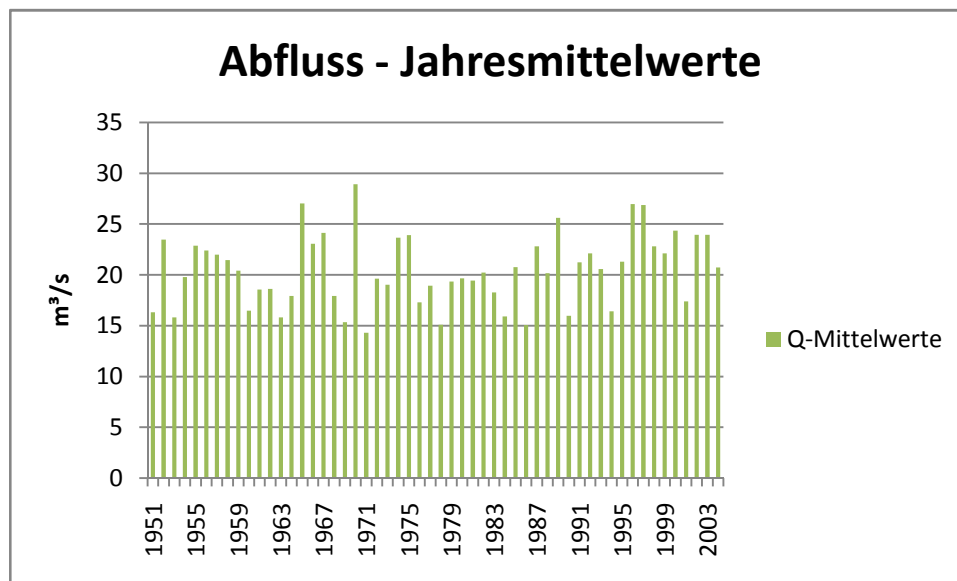
SINGERIN (HÖLLENTAL)



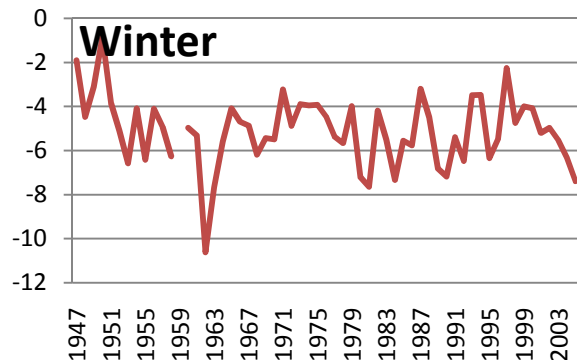
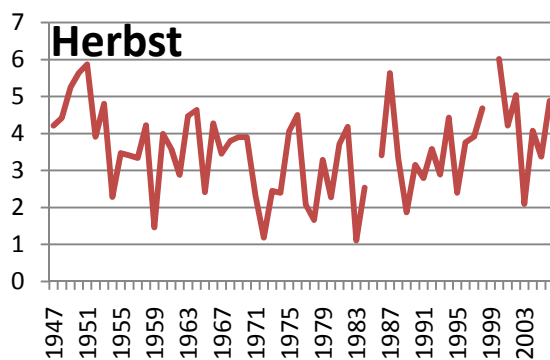
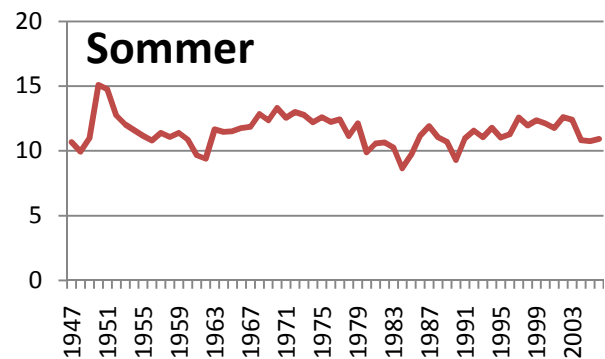
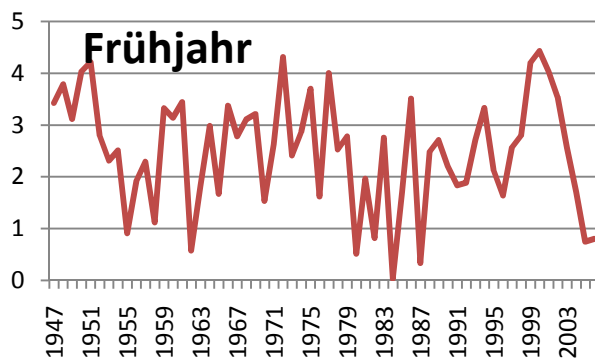
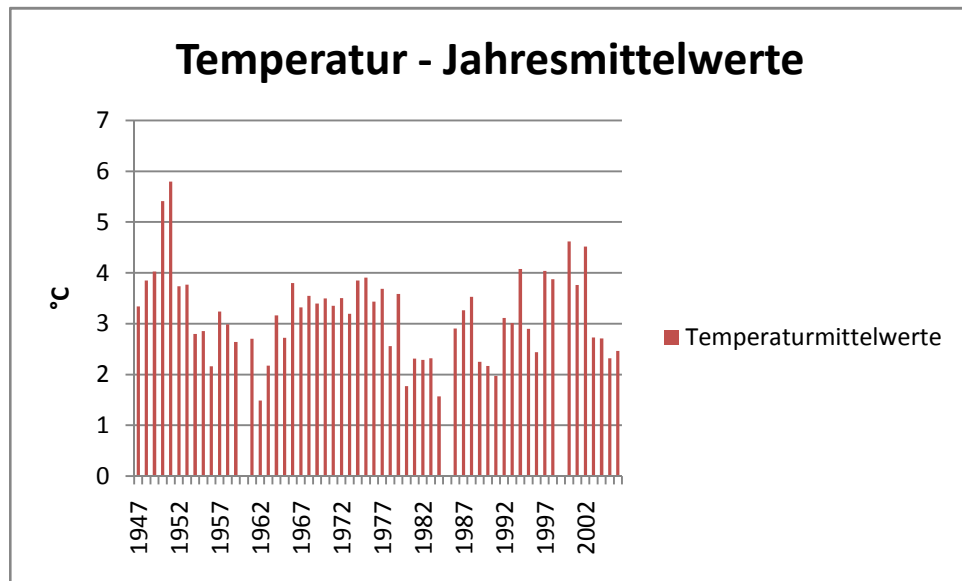
SINGERIN (STEG)



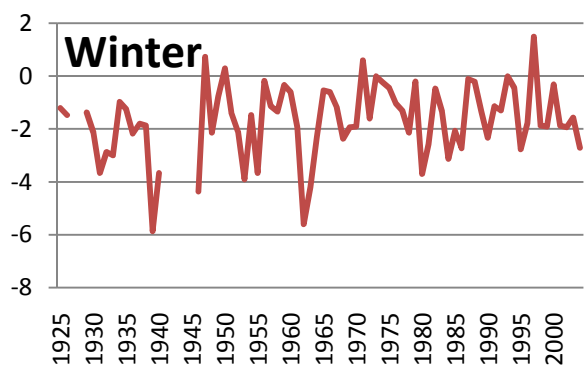
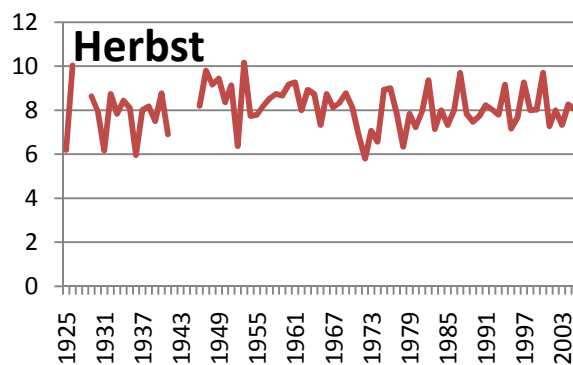
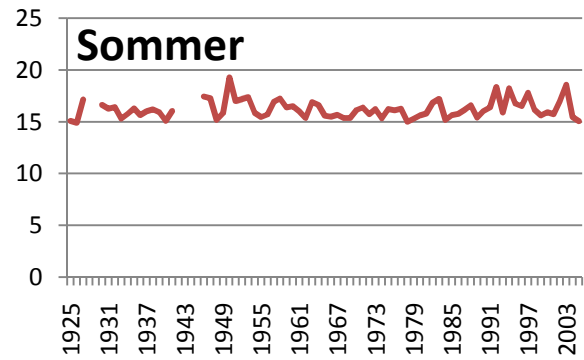
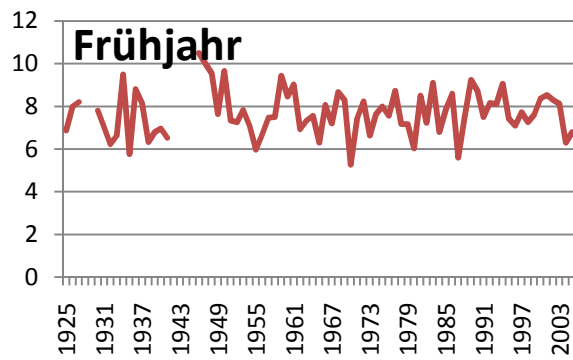
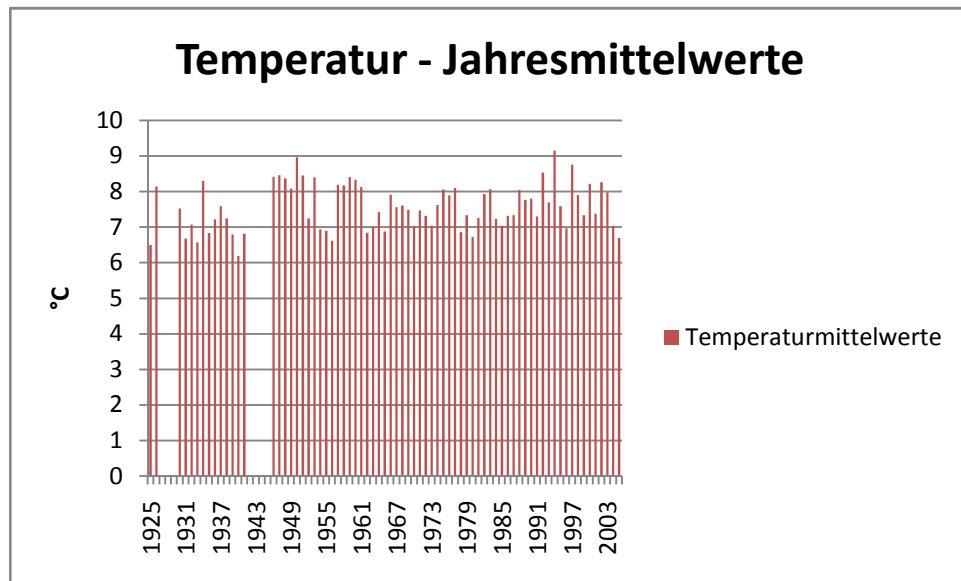
WILDALPEN



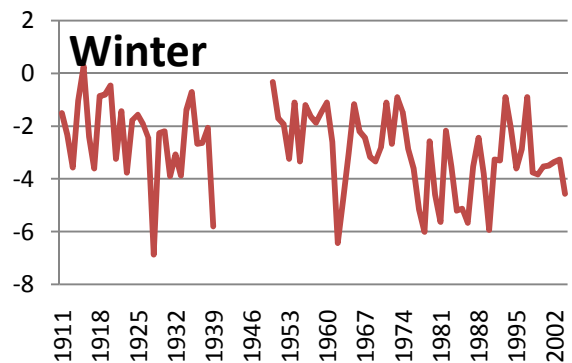
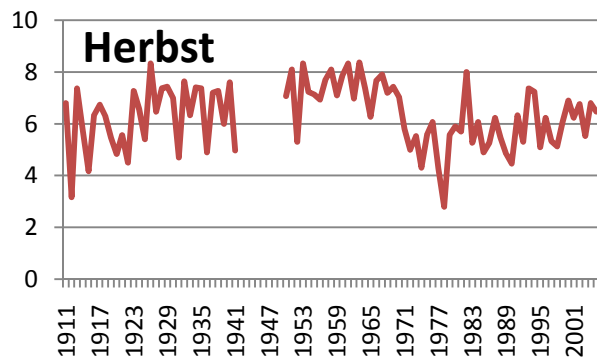
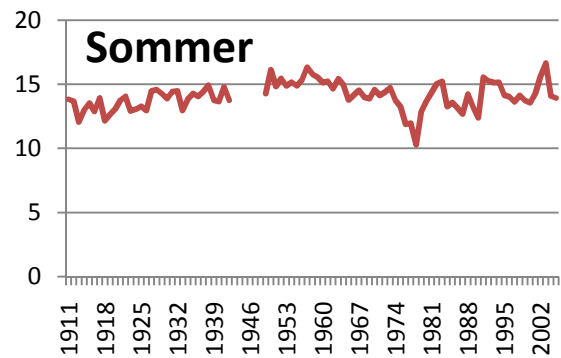
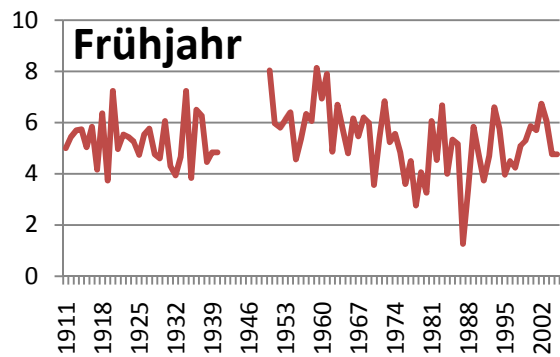
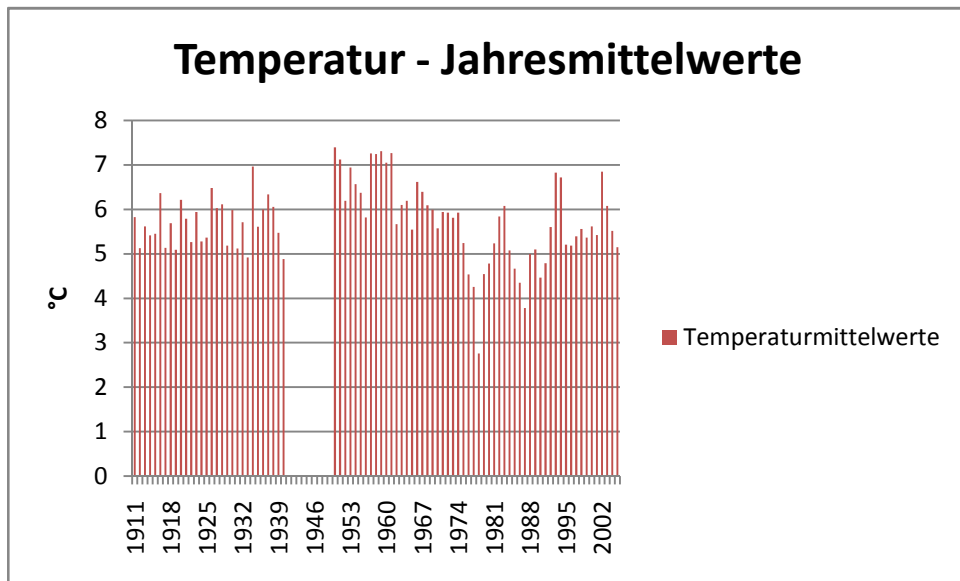
BRUNNGRABEN



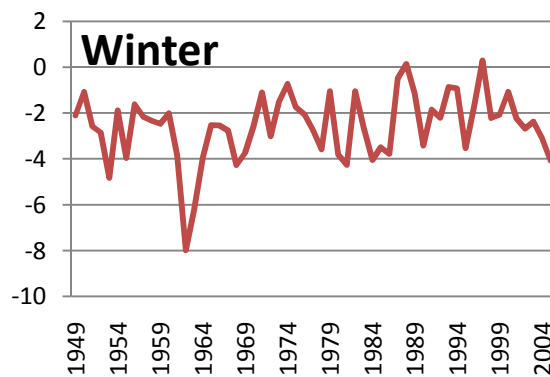
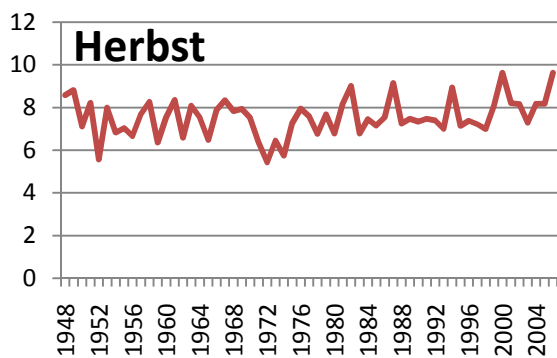
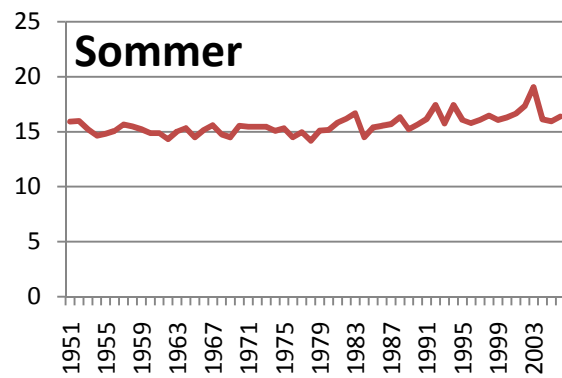
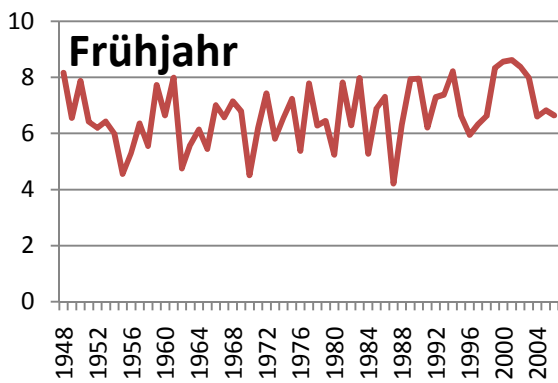
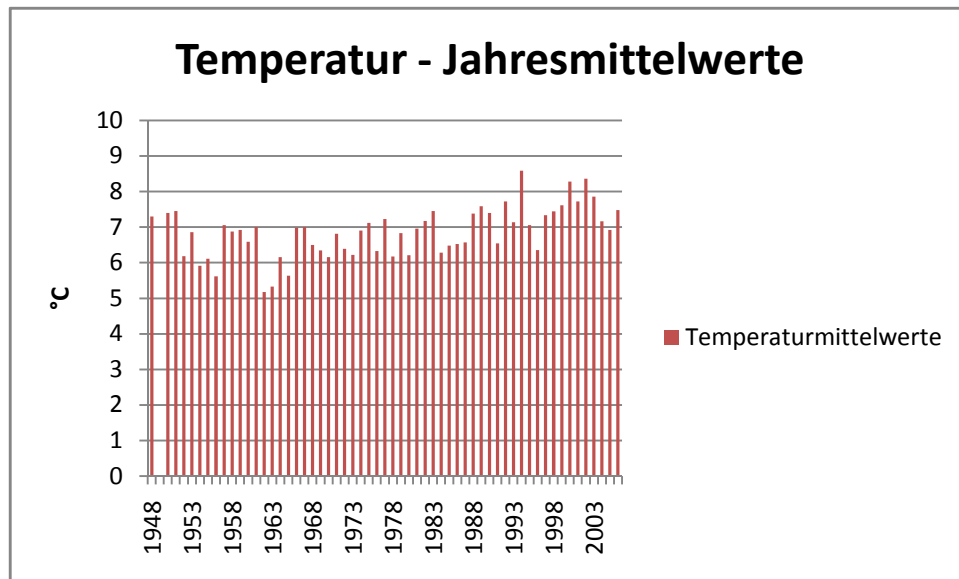
HIEFLAU



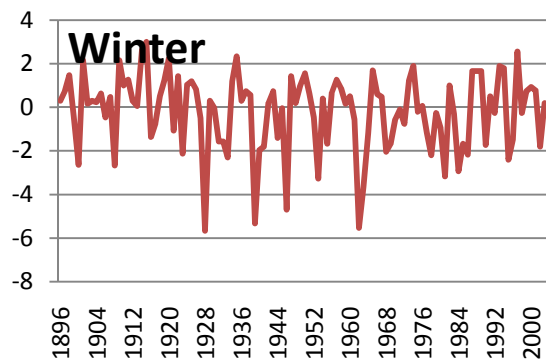
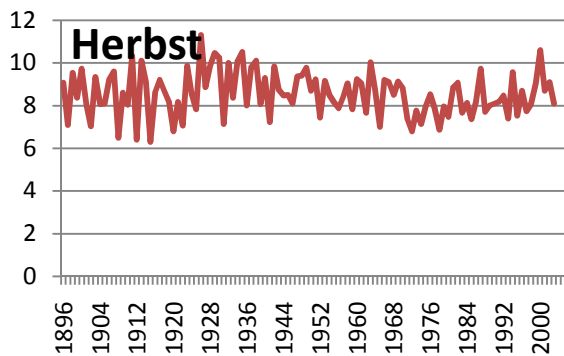
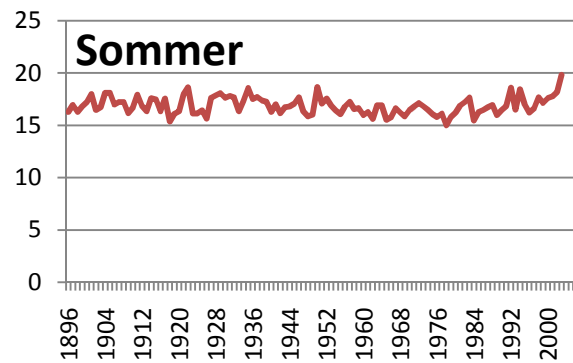
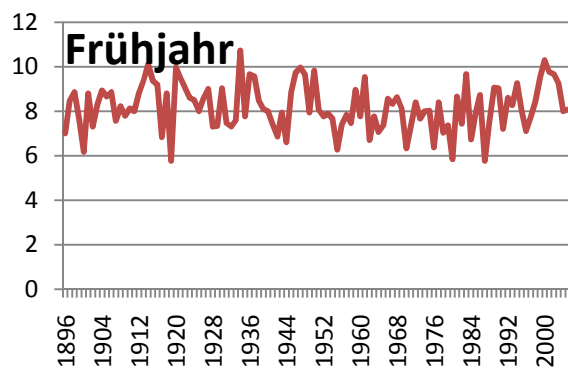
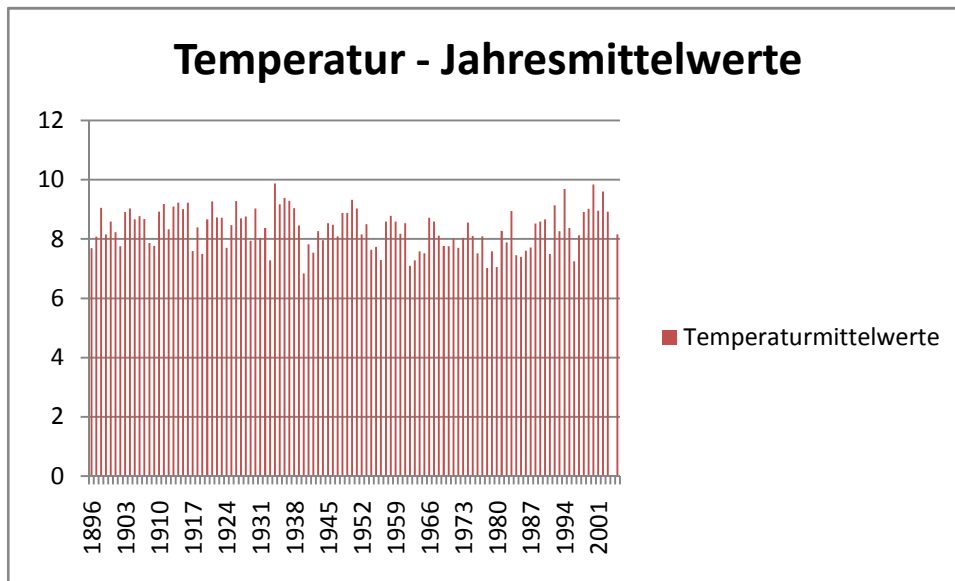
MÜRZSTEG



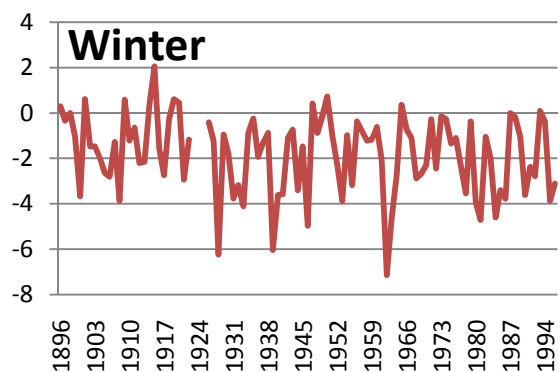
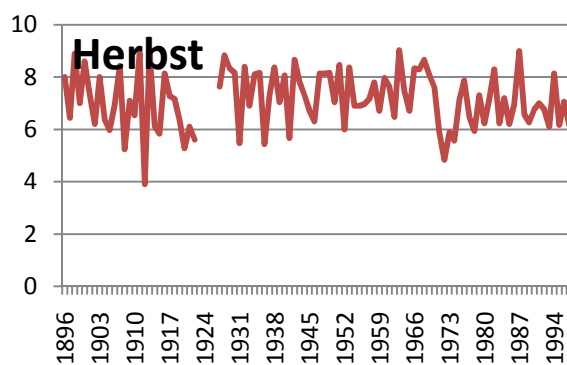
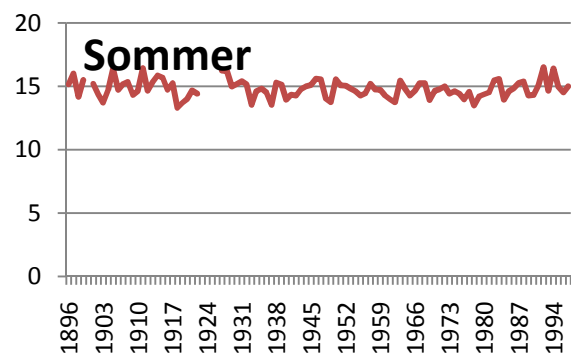
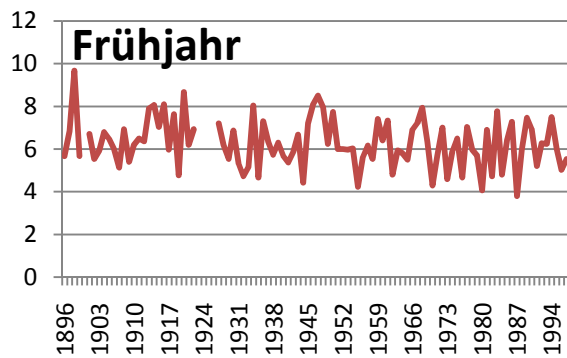
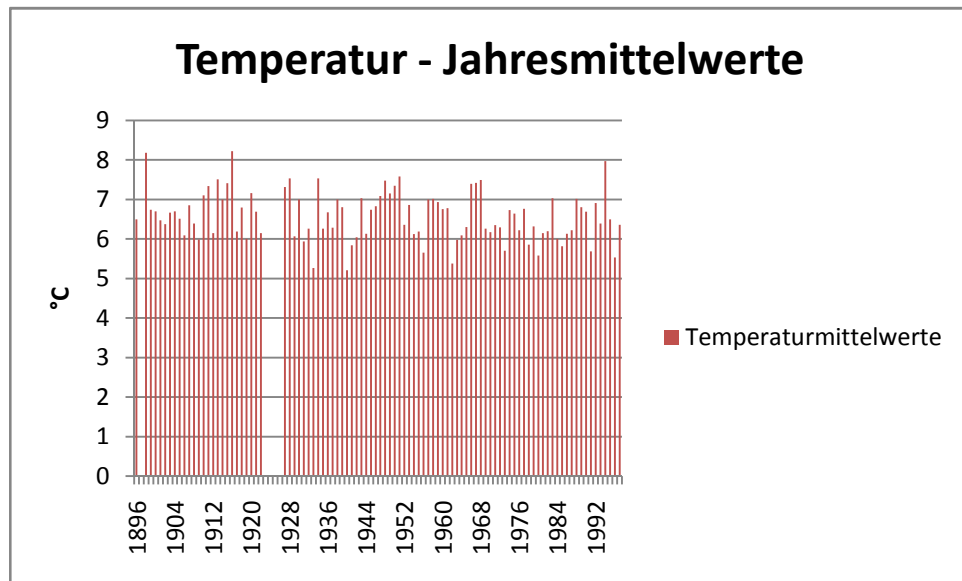
MÜRZZUSCHLAG



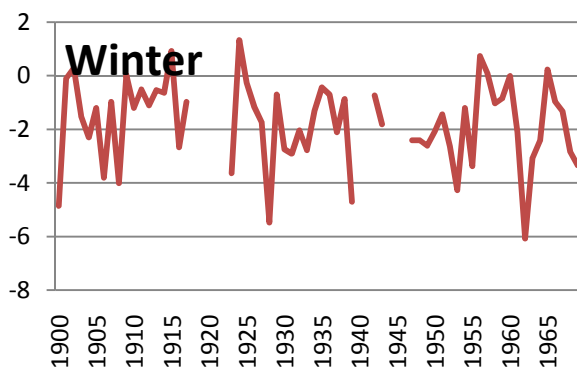
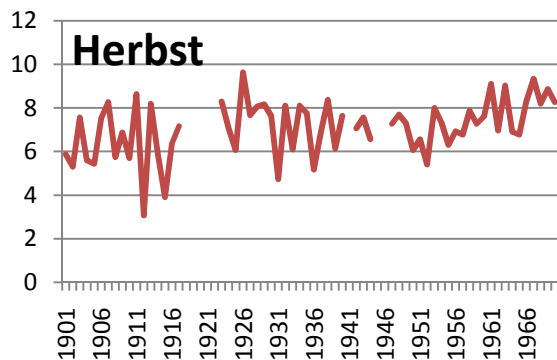
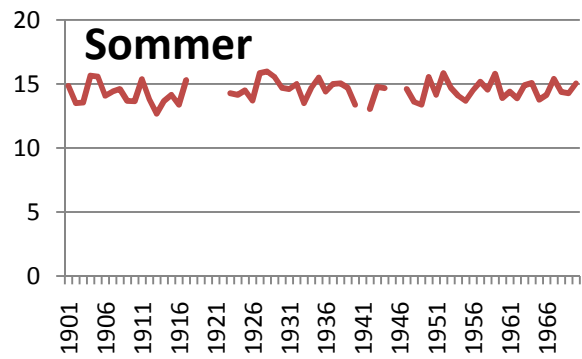
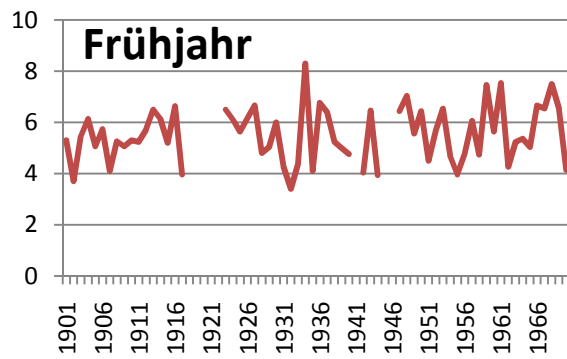
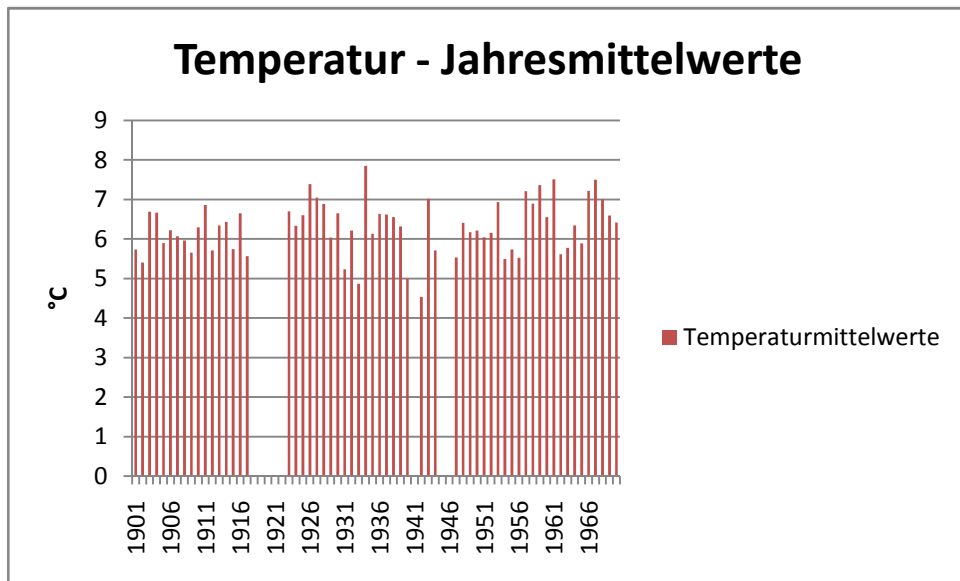
REICHENAU AN DER RAX



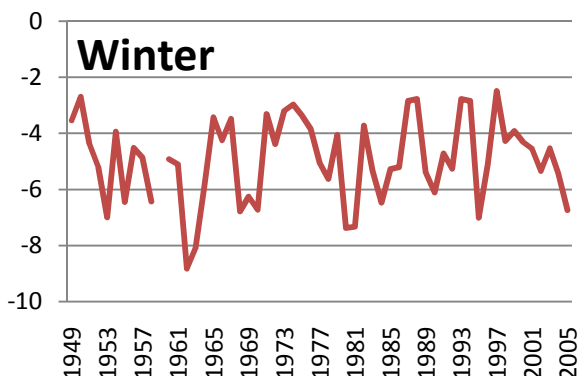
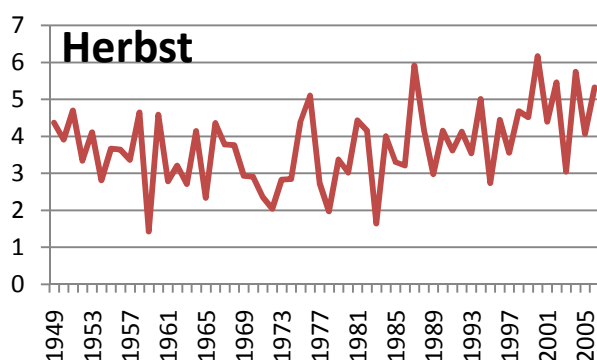
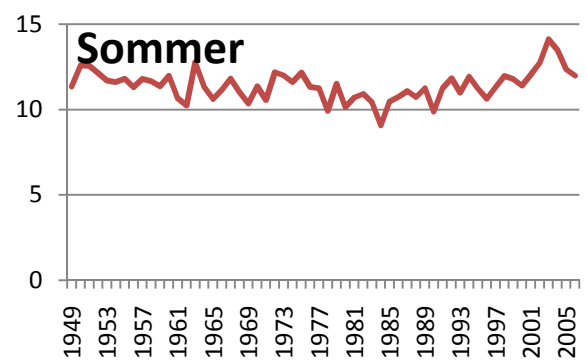
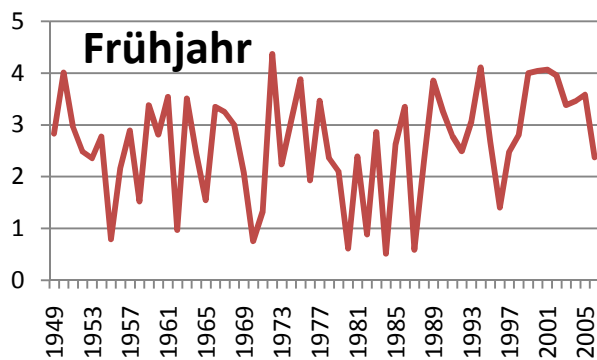
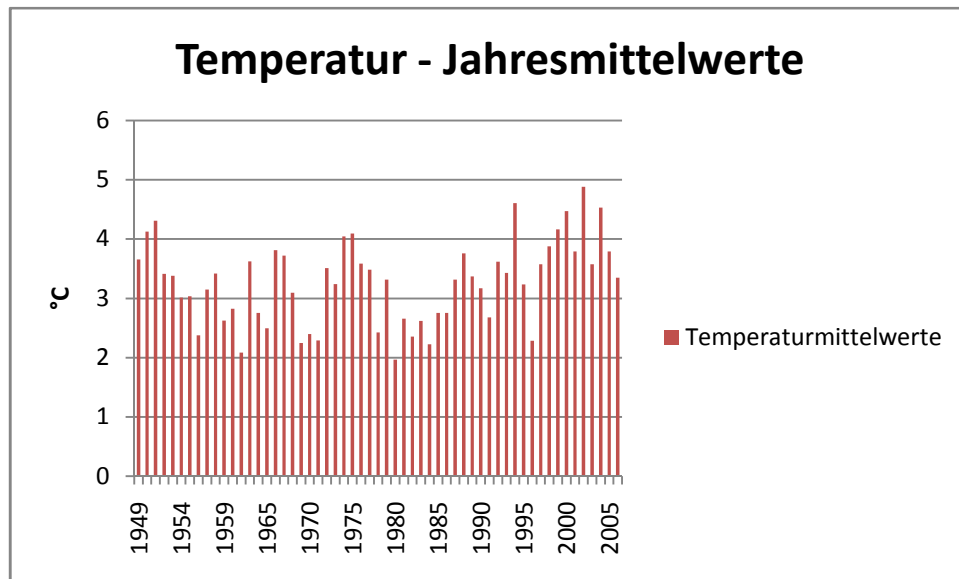
SCHWARZAU IM GEBIRGE



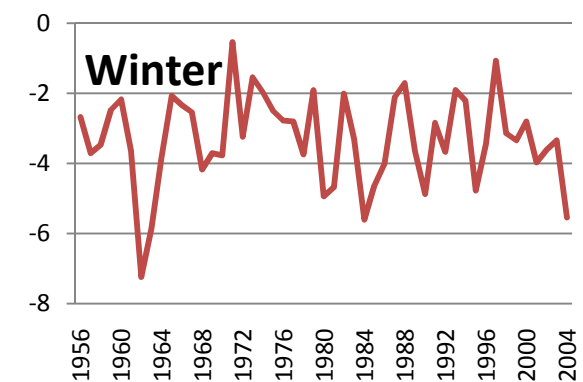
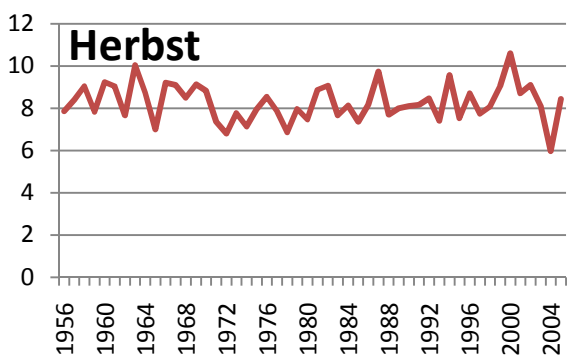
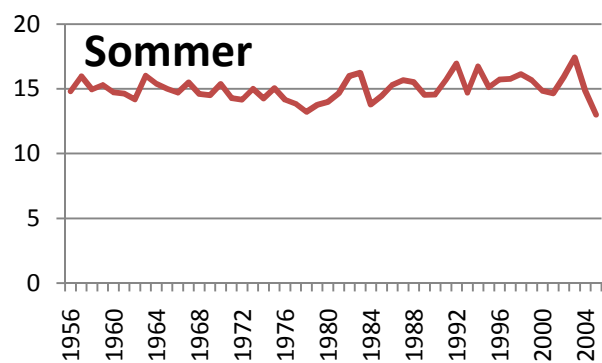
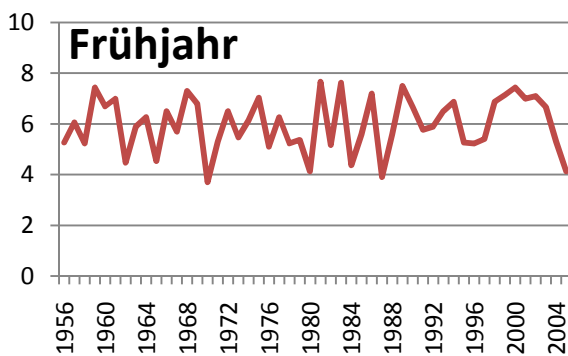
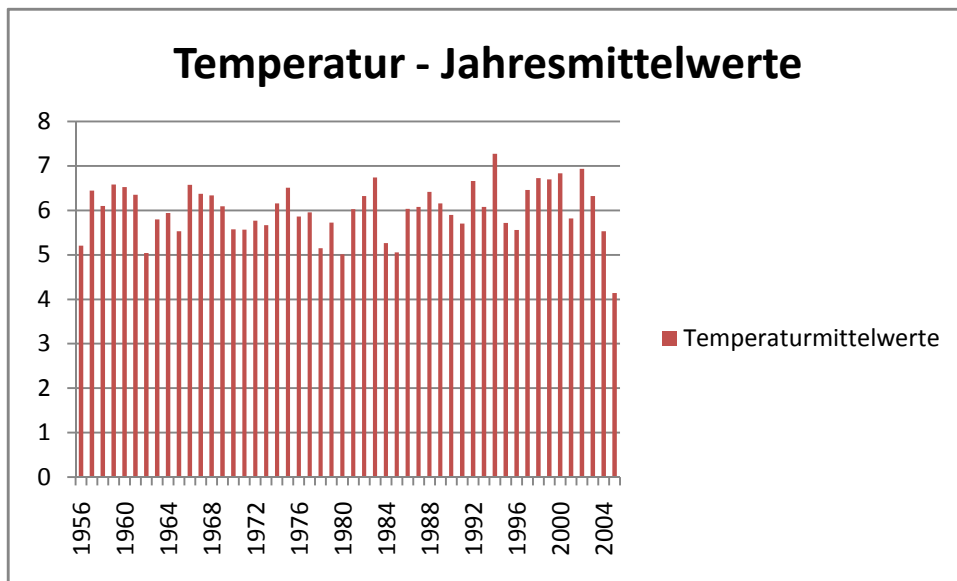
SEMMERING

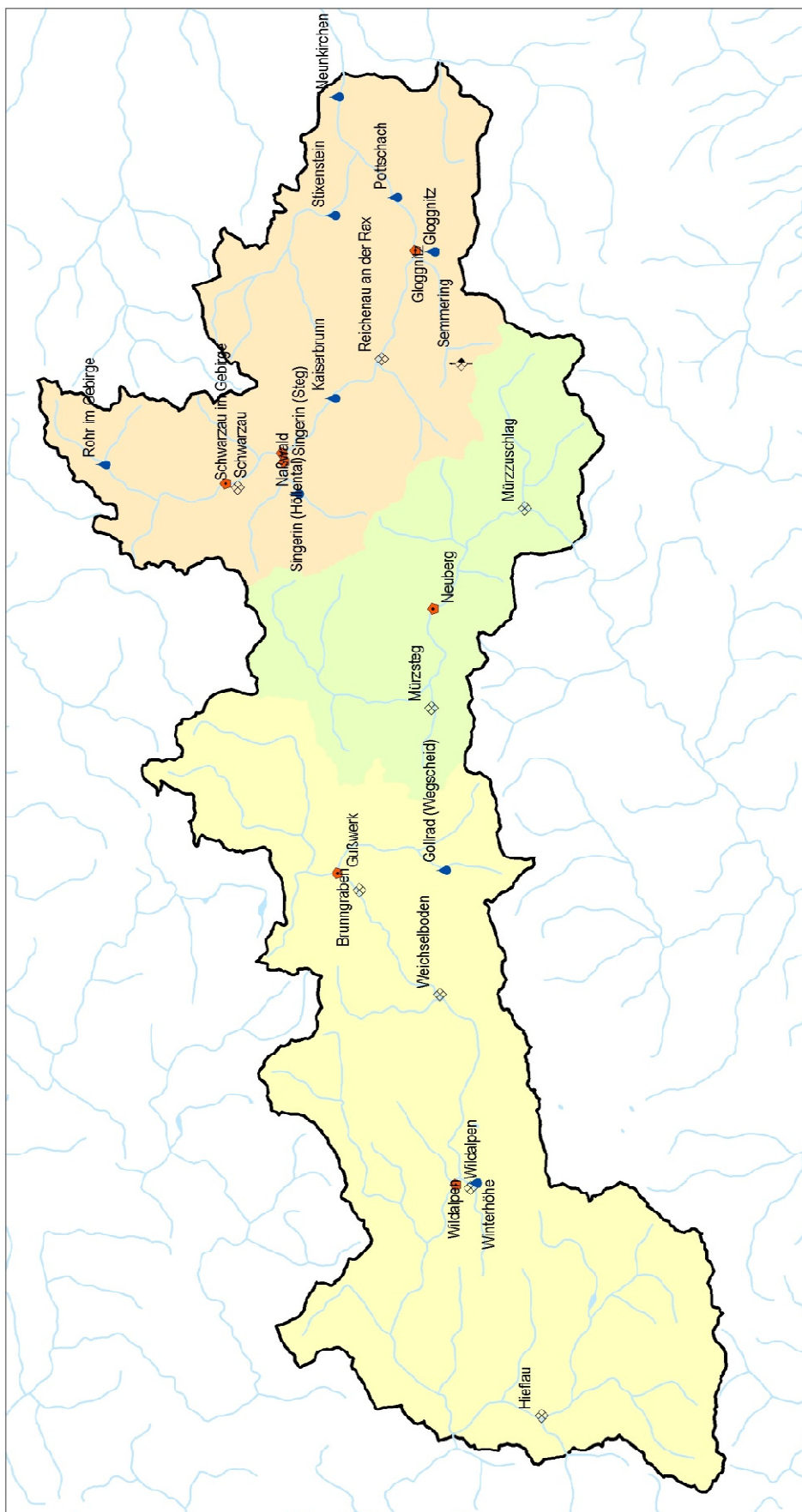


WEICHSELBODEN



WILDALPEN





Datum: 05/2008

Quelle: Hydrologischer Atlas; Eigene Digitalisierung

Mess-Stationen

- Niederschlag
- Temperatur
- Temperatur & Niederschlag
- Abfluss

Flusseinzugsgebiete

- Leitha
- Mur
- Enns

Untersuchungsraum

- Gewässer

Mess-Stationen im Überblick

Mess-Stationen für Niederschlag,
Temperatur und Abfluss
im Untersuchungsraum

ERKLÄRUNG

Ich versichere,

- dass ich die Diplomarbeit selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer/einem BeurteilerIn zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, _____

Datum

Unterschrift

CURRICULUM VITAE

Christina Maria Schartner

Alszeile 125a/6

1170 Wien

Persönliche Daten:

Geboren am 07.11.1981 in Bad Ischl, österreichische Staatsbürgerin, ledig

Schulbildung:

1987 – 1991 Volksschule in Althofen

1991 – 1996 Bundesgymnasium in St. Veit/Glan

1996 – 1997 Höhere Lehranstalt für Tourismus in Bad Ischl

1997 – 2002 Höhere Lehranstalt für Wirtschaftliche Berufe in St. Veit/Glan,
Schwerpunkt Fremdsprachen (Französisch, Italienisch), Englisch
als Arbeitssprache

Berufsausbildung:

2002 – 2008 Diplomstudium der Geographie am Institut für Geographie und
Regionalforschung, Universität Wien, Schwerpunkte in den
Fachbereichen Landschaftsökologie, Hydroklimatologie
(individueller Schwerpunkt) und Globale Umweltveränderungen

Praxis:

August, 2007 Praktikum bei den Wiener Wasserwerken im Bereich der
meteorologischen Datenerfassung und –verarbeitung

Weitere Tätigkeiten:

- Zur Finanzierung des Studiums Tätigkeiten im
Gastronomiebereich sowie in der Behindertenbetreuung
- Auslandsaufenthalte in Guernsey (4 Monate) und der Schweiz (2
Monate) – Praktika in der Gastronomie